

**Wirkungen von Biokohlen im System Boden-Pflanze.  
Untersuchungen auf sandigen Standorten**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum agriculturalarum

(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der

Lebenswissenschaftlichen Fakultät

der Humboldt-Universität zu Berlin

von

M. Sc. Katharina Reibe

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin: Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät: Prof. Dr. Richard Lucius

Gutachter

1. Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer

2. Prof. Dr. Jutta Zeitz

3. Prof. Dr. Stefan Kühne

Tag der mündlichen Prüfung: 18.06.2015

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
Zusammenfassung .....	1
Abstract .....	2
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1 Hintergrund .....	3
1.2 Pyrolyse .....	5
1.3 Hydrothermale Carbonisierung .....	5
1.4 Zielsetzung .....	6
<b>2 Kapitel 1: Einfluss von Biokohlen auf Wachstum, Entwicklung, Ertrag und Qualität von Winterweizen im Feldversuch .....</b>	<b>7</b>
2.1 Einleitung .....	7
2.2 Material und Methoden .....	9
2.3 Ergebnisse .....	15
2.4 Diskussion .....	24
2.5 Schlussfolgerungen .....	27
<b>3 Kapitel 2: Einfluss von Biokohlen auf bodenchemische Parameter sowie die Entwicklung von Nutzpflanzen im Gefäßversuch .....</b>	<b>28</b>
3.1 Einleitung .....	28
3.2 Material und Methoden .....	29
3.3 Ergebnisse .....	32
3.4 Diskussion .....	41
3.5 Schlussfolgerungen .....	44
<b>4 Kapitel 3: Wirkungen von Biokohlen auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen .....</b>	<b>45</b>
4.1 Einleitung .....	45
4.2 Material und Methoden .....	47
4.3 Ergebnisse .....	50
4.4 Diskussion .....	55
4.5 Schlussfolgerungen .....	60
<b>5 Kapitel 4: Sorption von Stickstoff an Biokohlen .....</b>	<b>61</b>
5.1 Einleitung .....	61
5.2 Material und Methoden .....	63
5.3 Ergebnisse .....	66

5.4	Diskussion .....	75
5.5	Schlussfolgerungen .....	78
<b>6</b>	<b>Kapitel 5: Einfluss von Biokohlen auf die Bodenfauna am Beispiel von Collembolen .....</b>	<b>80</b>
6.1	Einleitung.....	80
6.2	Material und Methoden.....	82
6.2.1	Gefäßversuch .....	82
6.2.2	Feldversuch .....	84
6.3	Ergebnisse .....	85
6.3.1	Gefäßversuch .....	85
6.3.2	Feldversuch .....	87
6.4	Diskussion .....	95
6.5	Schlussfolgerungen .....	99
<b>7</b>	<b>Bewertung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>100</b>
	Literaturverzeichnis .....	106
	Anhang .....	114
	Danksagungen .....	125

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Biokohlesystemkomponenten (Lehmann und Joseph, 2009) .....	4
<b>Abbildung 2:</b> Standort der Versuchsstation des IASP in Berge bei Nauen. ....	11
<b>Abbildung 3:</b> Temperaturverlauf (a) und Niederschlagsverteilung (b) des Jahres 2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010).....	12
<b>Abbildung 4:</b> Entwicklung von Winterweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung nach BBCH-Stadien (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest). ....	17
<b>Abbildung 5:</b> Entwicklung der Wuchshöhe (cm) von Winterweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest). ....	17
<b>Abbildung 6:</b> Verlauf der Blattgrüneinheiten von Winterweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest). ....	18
<b>Abbildung 7:</b> Kornerträge von Winterweizen ( $\text{dt ha}^{-1}$ , 86 % TS) des ersten (a), zweiten (b) und dritten (c) orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb der orthogonalen Kerne (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). ....	19
<b>Abbildung 8:</b> Entwicklung von Sommerweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung nach BBCH-Stadien (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest). ....	33
<b>Abbildung 9:</b> Entwicklung der Wuchshöhe (cm) von Sommerweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest). ....	34
<b>Abbildung 10:</b> Trockenmassen ( $\text{g Gefäß}^{-1}$ ) von Sommergerste (a) und Sommerraps (b) (n=8). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff). ....	38
<b>Abbildung 11:</b> Trockenmassen ( $\text{g Gefäß}^{-1}$ ) von Mais. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff). ....	39
<b>Abbildung 12:</b> Schematische Darstellung der verwendeten Rhizoboxen.....	48
<b>Abbildung 13:</b> Spross- (a, d) und Wurzeltrockenmassen (b, e) sowie Spross:Wurzel- Verhältnis (c, f) des ersten Rhizoboxversuchs (a, b, c) und des zweiten Rhizoboxversuchs (d, e, f) (n=6). (MW $\pm$ SD); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). ....	52
<b>Abbildung 14:</b> Wurzelmorphologie nach der Anwendung von Pyro-Biokohle (links) und HTC-Biokohle (rechts) vom 2. Rhizoboxversuch. ....	54
<b>Abbildung 15:</b> Stickstoffgehalte (%) der Pyro-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte $\pm$ SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). ....	67

<b>Abbildung 16:</b> Stickstoffgehalte (%) der HTC-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte $\pm$ SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). .....	69
<b>Abbildung 17:</b> $^{15}\text{N}$ -Gehalte ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) der Pyro-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte $\pm$ SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). .....	72
<b>Abbildung 18:</b> $^{15}\text{N}$ -Gehalte ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) der HTC-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte $\pm$ SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). .....	74
<b>Abbildung 19:</b> Schematische Darstellung der verwendeten Glasgefäße. ....	82
<b>Abbildung 20:</b> Sommerweizen und Collembolen im ersten Versuch beim Test unterschiedlicher Biokohlen (a,b,c) und im zweiten Versuch beim Test unterschiedlicher Mengen fermentierter HTC-Biokohle (d,e,f). Dargestellt sind die Sprosstrockenmassen ( $\text{g Gefäß}^{-1}$ ), Wurzeltrockenmassen ( $\text{g Gefäß}^{-1}$ ) und Collembolen ( $\text{kg Boden}^{-1}$ ). (MW $\pm$ SD); (Control = Kontrolle, Coll = Collembolen); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). .....	86
<b>Abbildung 21:</b> Populationsdichte der Bodenfauna (inkl. Collembolen) an 3 Terminen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). .....	88
<b>Abbildung 22:</b> Abundanzen der Collembolen an 3 Terminen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). .....	90
<b>Abbildung 23:</b> Shannon-Wiener Diversität ( $H'$ ) der Collembolenfauna im Jahresverlauf im Boden der unterschiedlichen Behandlungen.....	93
<b>Abbildung 24:</b> Aufteilung der Collembolen nach Lebensformen zu den drei Terminen. (Individuen $\text{m}^{-2} \pm \text{SD}$ ), EP - epedaphisch, H - hemiedaphisch, EU - euedaphisch.....	95

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Chemische Eigenschaften der verwendeten Biokohlen (verändert nach Mumme und Diakité (2013)).	10
<b>Tabelle 2:</b> Kombinationen von Pr�faktoren und Faktorstufen im Feldversuch (GR = Gärrest).	13
<b>Tabelle 3:</b> Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte vor Versuchsbeginn und nach der Ernte des Winterweizens (MW $\pm$ SD).	16
<b>Tabelle 4:</b> Nährstoffgehalte im Weizenstroh und –korn, Rohproteingehalt und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Gärrest und Interaktionen des ersten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.	21
<b>Tabelle 5:</b> $P_{\text{Korn}}$ , Fallzahl, Sedimentationswert und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Stickstoff und Interaktionen des zweiten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.	22
<b>Tabelle 6:</b> Hektolitergewicht, Fallzahl, Sedimentationswert und die P-Werte für die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff und Interaktionen des dritten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.	23
<b>Tabelle 7:</b> Chemische Eigenschaften des verwendeten Bodens (n=2) (TM = Trockenmasse).	30
<b>Tabelle 8:</b> Statistische Unterschiede in der Wuchshöhe von Sommerweizen zwischen den Behandlungen, Haupt- und Wechselwirkungen zu den jeweiligen Zeitpunkten im Jahr 2013. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (n.s. = nicht signifikant, s. = signifikant).	35
<b>Tabelle 9:</b> Ertrag, Ernteindex und Parameter der Ertragsstruktur von Sommerweizen (n=4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (GR = Gärrest; N = Stickstoff).	36
<b>Tabelle 10:</b> Nährstoffgehalte im Stroh (a) und Rohproteingehalte des Korns (b) von Sommerweizen (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (GR = Gärrest; N = Stickstoffdüngung).	37
<b>Tabelle 11:</b> Nährstoffgehalte des Maises (n=8). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey’s HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff).	39
<b>Tabelle 12:</b> Chemische Parameter des Bodens (n=8). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den	

Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff).....	40
<b>Tabelle 13:</b> Chemische Eigenschaften der für die Rhizoboxversuche verwendeten Böden (n=2) (TM = Trockenmasse).....	47
<b>Tabelle 14:</b> Chemische Eigenschaften der Filtrate der Kohlen (n=2) (TM = Trockenmasse, TNb = gesamter gebundener Stickstoff (total nitrogen bound), TOC = gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon). ...	50
<b>Tabelle 15:</b> Chemische Eigenschaften der Bodenproben (n=3). (Mittelwerte $\pm$ SD); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). ....	50
<b>Tabelle 16:</b> Parameter der Wurzelmorphologie von Sommerweizen im Boden (Kontrolle) oder Boden gemischt mit Biokohlen (Pyro, Pyreg, HTC). (MW $\pm$ SD); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). ....	53
<b>Tabelle 17:</b> Stickstoffquellen und deren $^{15}\text{N}$ -Markierung (Atom-% $^{15}\text{N}$ ), $^{15}\text{N}$ -Gehalte ( $\text{mg } ^{15}\text{N g}^{-1}$ ) und N-Gehalte (%). ....	64
<b>Tabelle 18:</b> Effekte der Biokohle (PYRO) und Collembolen (COLL) auf Spross- und Wurzelwachstum und die Wurzelmorphologie von Sommerweizen (MW $\pm$ SD) (KON = Kontrolle, COLL = Collembolen). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen in den Zeilen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). ....	87
<b>Tabelle 19:</b> Artenstruktur der Collembolen der ersten Probenahme (6. März 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben sind Abundanz der Arten (Individuen $\text{m}^{-2} \pm \text{SD}$ ), Summe der Arten und Diversitätsindex. SR – Artenreichtum. E = epedaphische, H = hemiedaphische, EU = euedaphische Art; ANOVA mit $P \leq 0.05$ . ....	91
<b>Tabelle 20:</b> Artenstruktur der Collembolen der zweiten Probenahme (28. April 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben sind Abundanz der Arten (Individuen $\text{m}^{-2} \pm \text{SD}$ ), Summe der Arten und Diversitätsindex. SR – Artenreichtum. E = epedaphische, H = hemiedaphische, EU = euedaphische Art; ANOVA mit $P \leq 0.05$ . ....	92
<b>Tabelle 21:</b> Artenstruktur der Collembolen der dritten Probenahme (23. Oktober 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben sind Abundanz der Arten (Individuen $\text{m}^{-2} \pm \text{SD}$ ), Summe der Arten und Diversitätsindex. SR – Artenreichtum. E = epedaphische, H = hemiedaphische, EU = euedaphische Art; ANOVA mit $P \leq 0.05$ . ....	93
<b>Tabelle 22:</b> Bewertung der Einflüsse von Biokohlen auf ausgewählte Parameter der Felduntersuchungen und Gefäßuntersuchungen bei praxisüblicher Stickstoffdüngung. (n.b. nicht bestimmt) .....	101
<b>Tabelle 23:</b> Bewertung der Einflüsse von Biokohlen auf ausgewählte Parameter der Rhizoboxversuche und Gefäßversuche mit Collembolen. (n.b. nicht bestimmt) .....	102

## Abkürzungsverzeichnis

ATB:	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
BBCH:	Skala zur Beschreibung der Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen
BBodSchG:	Bundesbodenschutzgesetz
C <sub>t</sub> :	Gesamtkohlenstoff
C <sub>org</sub> :	Organischer Kohlenstoff
Ca:	Calcium
DWD:	Deutscher Wetterdienst
EEG:	Erneuerbare Energien Gesetz
FIBC:	Flexible Intermediate Bulk Container
FNR:	Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe
Fe:	Eisen
FM:	Frischmasse
GR:	Gärrest
HSD:	Honestly Significant Difference
HTC:	Hydrothermale Carbonisierung
IASP:	Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin
KAS:	Kalkammonsalpeter
K <sub>DL</sub> :	Kalium aufgeschlossen nach der Doppellaktat-Methode
Mg:	Magnesium
MW:	Mittelwert
N <sub>t</sub> :	Gesamtstickstoff
N <sub>min</sub> :	Mineralisch gebundener Stickstoff
n.b.:	nicht bestimmt
ns:	nicht signifikant
P <sub>DL</sub> :	Phosphor aufgeschlossen nach der Doppellaktat-Methode
SD:	standard deviation (Standardabweichung)
TM:	Trockenmasse



TS:	Trockensubstanz
Tnb:	total nitrogen bound (gesamter gebundener Stickstoff)
TOC:	total organic carbon (entspricht $C_{org}$ )
TS:	Trockensubstanz
s:	signifikant
vs:	versus
WHK:	Wasserhaltekapazität

## Zusammenfassung

Die Anwendung von Biokohlen in der Landwirtschaft gewinnt durch die positiven Aspekte der Kohlenstoffsequestrierung, Bodenverbesserung und eines erhöhten Pflanzenwachstums in den letzten Jahren an Bedeutung. Deshalb geht die vorliegende Arbeit den Fragen nach, welche Wirkungen unterschiedliche Biokohlen in Kombination mit oder ohne Gärrest und / oder Stickstoffdünger auf die Bodenchemie, Bodenbiologie und Wachstum, Entwicklung, Ertrag, Ertragsstruktur, Nährstoffe sowie Qualität von Nutzpflanzen haben. Außerdem wurden die Effekte unterschiedlicher Biokohlen auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen quantifiziert. Eine weitere Frage war, inwiefern Biokohlen Stickstoffquellen sorbieren. Es wurden ein Feldversuch und mehrere Gefäßversuche durchgeführt, um die Änderungen der Bodenchemie, den Einfluss auf die Bodenbiologie am Beispiel von Collembolen und die Pflanzenparameter zu bestimmen. Für die Wurzeluntersuchungen wurden Rhizoboxversuche mit drei Biokohlen (Pyro, Pyreg, HTC) durchgeführt und zur Quantifizierung der Stickstoffsorption ein *in vitro* Versuch angelegt.

Die Ergebnisse des Feldversuchs und der Gefäßversuche zeigten, dass die Biokohlen die Bodeneigenschaften positiv beeinflussten. Die Biokohlen nahmen keinen konsistenten Einfluss auf die Erträge von Kulturpflanzen. Die Nährstoffgehalte der Kulturpflanzen sowie der Rohproteingehalt von Weizen konnten zum Teil positiv beeinflusst werden. Die Abundanzen der Collembolen zeigten sowohl in der Feldstudie als auch im Gefäßversuch keine signifikanten Unterschiede zwischen den getesteten Biokohlen. Hohe Mengen der fermentierten HTC-Biokohle führten zu negativen Wirkungen auf die Collembolenabundanz im Gefäßversuch. Die Stickstoffdüngung hatte im Feldversuch und in den Gefäßversuchen die Hauptwirkung. Die Rhizoboxversuche zeigten einen positiven Einfluss der Pyro-Biokohle auf die oberirdische und unterirdische Trockenmasse sowie die Wurzelmorphologie von Sommerweizen. Unterschiedliche Stickstoffquellen wurden von der HTC-Biokohle stärker sorbiert als von der Pyro-Biokohle.

Generell lässt sich aus den differenzierten Wirkungen der Biokohlen weitere Forschung mit dem Fokus Boden ableiten. Dafür sollten mehrjährige Versuche angelegt werden, um Folgewirkungen abzuschätzen.

## Abstract

Over the past few years the use of biochars in agriculture has gained more importance due to positive effects on carbon sequestration, soil improvement and increased plant growth. Therefore, the present work pursues the question which effects different biochars have in combination with or without digestate and / or nitrogen fertilizer on soil chemistry, soil biology and growth, development, yield, yield components, nutrients and quality of crops. In addition, the effects of different biochars on root morphology of spring wheat were quantified. Further to elucidate potential mechanisms underlying biochar effects on crops it was studied how biochars sorb various nitrogen sources.

A field test and several pot experiments were conducted to determine the changes in soil chemistry, the impact on soil-dwelling Collembola and plant parameters. For the root studies rhizobox experiments were performed with three types of biochars (Pyro, Pyreg, HTC). To quantify the nitrogen sorption of biochars an *in vitro* experiment was conducted.

The results of the field test and pot experiments showed that biochars positively affected soil chemical characteristics. However, straw and grain yields of crops were not consistently affected by biochars. The nutrient content of crops, and the crude protein content of wheat was positively influenced to some extent. The abundance of Collembola was not significantly influenced by the biochars tested in the field study and in the pot experiment. High amounts of fermented HTC-biochar had negative effects on the abundance of Collembola in the pot experiment. In the field experiment and pot experiments nitrogen fertilization had larger effects on all tested parameters than biochar. Rhizobox experiments showed a positive influence of Pyro-biochar on the aboveground dry matter, belowground dry matter and root morphology (e.g. root length) of spring wheat. Amount and reversibility of nitrogen sorption was dependent on the type of biochar with HTC-biochar sorbing more nitrogen than Pyro- biochar.

Generally it can be concluded that because of the different effects of biochars further research with a focus on soil is needed. Long-term experiments should be conducted to estimate consequences of biochar application.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

„... (2) Grundsätze der guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung sind die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource. Zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis gehört insbesondere, dass... 6. die biologische Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolgegestaltung erhalten oder gefördert wird und 7. der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird. (3)...“ (BBodSchG 1998, § 17).

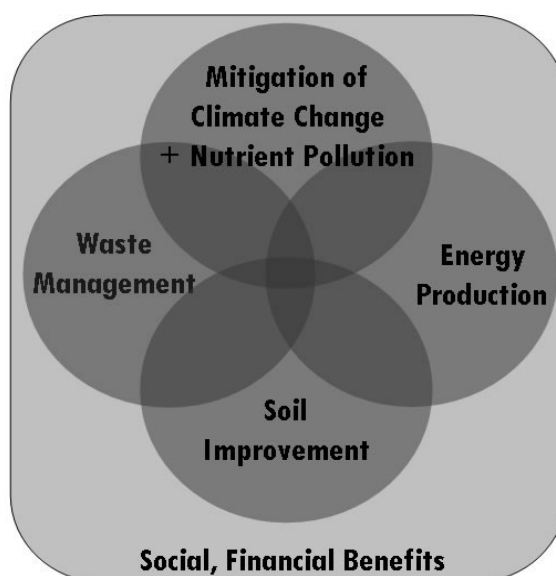
Im Ackerbau wird zwischen humuszehrenden (u.a. Silomais, Zuckerrüben, Kartoffeln) und humusmehrenden (u.a. Ackergras, Klee, Luzerne) Kulturen unterschieden. Neben dem Anbau von humuszehrenden Kulturen wird der Humusabbau durch die Abfuhr von Ernterückständen (u.a. Stroh) begünstigt. Ein Absinken des Humusgehaltes wirkt sich dabei negativ auf wichtige Bodenfunktionen, wie z.B. das Wasserhaltevermögen, die Nährstoffspeicherung und die biologische Aktivität aus, und kann mittel- und langfristig zu Bodenerosionen, Verdichtungen, Versalzung, Nährstoffmangel und Austrocknung führen. Damit würde die Biomassenutzung in Widerspruch zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung (BBodSchG 1998, § 17) geraten. Daher muss durch den Anbau von Zwischenfrüchten sowie der Rückführung von Ernterückständen oder die Zufuhr von organischen Düngern (Gülle, Kompost, Stallmist) das Absinken des Humusgehaltes langfristig vermieden werden.

Nach Schuchardt und Vorlop (2010) fallen in Deutschland jährlich rund 100 Millionen Tonnen Trockenmasse (TM) pflanzlicher Rest- und Abfallstoffe an, wovon 59 Millionen Tonnen TM aus der Landwirtschaft, 31 Millionen Tonnen TM aus der Forstwirtschaft, 3 Millionen Tonnen TM aus der Biotop- und Landschaftspflege, 2 Millionen Tonnen TM aus der Lebensmittelindustrie und ebenfalls 2 Millionen Tonnen TM von den Kommunen stammen. Diese Stoffe können als nachwachsende Rohstoffe (Energieerzeugung), als Futtermittel in der Tierhaltung oder zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit verwendet werden und stehen daher durch die unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten in einer Nutzungskonkurrenz.

Zur Energieerzeugung aus Bioabfällen werden die Verfahren Verbrennung, Vergasung oder Vergärung angewendet. Dabei wird die gleiche Menge an Kohlenstoff freigesetzt, die Pflanzen während der Photosynthese aufgenommen haben. Aus diesem Grund gilt Bioabfall beim Umwandlungsprozess als „CO<sub>2</sub>-neutral“. Für die Verbrennung müssen wasserhaltige Bioabfälle energieaufwendig getrocknet werden. Häufig werden Bioabfälle kompostiert, da größtenteils die Vergärung aufgrund der meist geringen Methanausbeute der Bioabfälle ebenfalls entfällt. Das Verfahren der Vergärung von Bioabfällen hat allerdings in der Novellierung des Erneuerbare-Energien Gesetzes (EEG) von 2014 in §45 an Bedeutung gewonnen, in dem die Vergütung im Vergleich zur Biomasse (Mais u.a.) höher angesetzt wurde.

Neben dem Vorteil der Kompostierung, der in der Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehaltes des Bodens und damit langfristig des Humusgehaltes besteht, hat die Kompostierung den entscheidenden Nachteil, dass der überwiegende Teil des in Bioabfall gebundenen Kohlenstoffs während der Kompostierung durch Mikroorganismen schnell zu CO<sub>2</sub> umgewandelt wird. Damit steht dieser Kohlenstoff dem Humusaufbau nicht mehr zur Verfügung.

Eine alternative Nutzungsmöglichkeit der Bioabfälle, Holzabfälle und Biomasse, die sowohl bodenverbessernd, klimawirksam, energieeffizient als auch zur Verwertung von Abfällen beitragen könnte, wäre die Herstellung von Biokohlen durch Pyrolyse oder Hydrothermale Carbonisierung (HTC) (Abb.1).



**Abbildung 1:** Biokohlesystemkomponenten (Lehmann und Joseph, 2009)

Abbildung 1 zeigt, dass durch die Verwendung von Biokohlen neben Bodenverbesserungen, dem Abfallmanagement, der Abschwächung des Klimawandels sowie der Energieproduktion soziale und finanzielle Vorteile entstehen können (Lehmann und Joseph, 2009).

## 1.2 Pyrolyse

Ein Verfahren zur Herstellung von Biokohlen ist die Pyrolyse, bei der trockenes organisches Material in einem geschlossenen Behälter unter dem Ausschluss von Sauerstoff auf hohe Temperaturen (etwa 400 bis 850 °C) erhitzt wird (Laird et al., 2009; Lehmann und Joseph, 2009). Dabei muss zwischen langsamer und schneller Pyrolyse unterschieden werden, was auf die Zeit, in der die Biomasse sich ändert, zurückgeführt wird. Schnelle Pyrolyse mit einer Verweilzeit von wenigen Sekunden, erzeugt mehr Bio-Öl und weniger Biokohle als die langsame Pyrolyse, bei der die Verweilzeiten der Biomasse von Minuten bis zu Stunden reichen (Laird et al., 2009; Mohan et al., 2006).

Nach Lehmann et al. (2006) kann pyrolysierte Biokohle verwendet werden, um die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern und gleichzeitig dem Klimawandel durch die langfristige Kohlenstoffspeicherung im Boden entgegenwirken. Der sehr langsame Abbau von pyrolysierten Biokohlen im Boden und der hohe Kohlenstoffgehalt unterscheidet diese von anderen organischen Düngern, wie z.B. dem Kompost oder Gärresten. Bei der Anwendung von Biokohlen in eher nährstoffarmen Böden wurden in einigen Gefäß- und Feldversuchen positive Effekte auf das Pflanzenwachstum beobachtet (Asai et al., 2009; Chan et al., 2007; Van Zwieten et al., 2010). Insgesamt lagen die positiven Effekte der Biokohlen bei 10 % (Jeffery et al., 2011).

## 1.3 Hydrothermale Carbonisierung

Der exotherme Prozess der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC) stellt ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Biokohlen dar. Es handelt sich dabei um eine wässrige Verkohlung von organischen bzw. pflanzlichen Ausgangsmaterialien, die bei einer im Vergleich zur Pyrolyse deutlich geringeren Temperatur (180-250 °C) und erhöhtem Druck innerhalb von 4-12 Stunden abläuft (Titirici et al., 2007). Der wesentliche Vorteil des HTC-Verfahrens gegenüber der Pyrolyse liegt darin, dass Ausgangsmaterialien genutzt werden können, die einen hohen Wassergehalt

aufweisen, da die Konversion bei der HTC im wässrigen Milieu stattfindet. Dabei kann ein kohlenstoffreiches Endprodukt entstehen (Libra et al., 2011).

In Untersuchungen mit HTC-Biokohlen wurden poröse Strukturen mit großer aktiver Oberfläche beobachtet, die je nach Prozessbedingungen der Hydrothermalen Carbonisierung variierten (Fuertes et al., 2010; Sevilla und Fuertes, 2009; Sevilla et al., 2011). Da vermutet wird, dass HTC-Biokohle eine erhöhte Stabilität gegen mikrobiellen Abbau im Vergleich zu Kompost aufweisen könnte (Fuertes et al., 2010; Sevilla et al., 2011), kann die HTC-Biokohle, ähnlich wie bei der Ausbringung von Kompost, zum Humusaufbau beitragen sowie die Bodeneigenschaften und damit das Pflanzenwachstum verbessern (Libra et al., 2011). Es ist noch nicht bekannt, welches Ausgangsmaterial und welche Prozessbedingungen zur Herstellung von bodenverbessernden pyrolysierten Biokohlen und HTC-Biokohlen gewählt werden sollten.

#### 1.4 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation, die in das durch die Leibniz-Gemeinschaft geförderte Verbundprojekt „Biokohlen in der Landwirtschaft - Perspektiven für Deutschland und Malaysia“ eingebettet war, werden folgende Fragestellungen im Detail untersucht:

1. Welchen Einfluss hat die Anwendung von Biokohlen auf einem sandigen Standort in Brandenburg auf Wachstum, Entwicklung, Ertrag und Qualität von Winterweizen?
2. Welche Veränderungen bodenchemischer Parameter und des Pflanzenwachstums hat die Anwendung der unterschiedlichen Biokohlen im Gefäßversuch zur Folge?
3. Welchen Einfluss haben Biokohlen auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen?
4. Werden unterschiedliche Stickstoffquellen an den Biokohlen sorbiert? Welche Konsequenzen hat die Stickstoffsorption für den Einsatz von Biokohlen in der Landwirtschaft?
5. Beeinflusst die Anwendung von Biokohlen die Bodenfauna? Gibt es Interaktionen zwischen Biokohlen und Collembolen?

## **2 Kapitel 1: Einfluss von Biokohlen auf Wachstum, Entwicklung, Ertrag und Qualität von Winterweizen im Feldversuch**

### **2.1 Einleitung**

Sowohl in Gefäß- als auch in Feldversuchen wurden ertragssteigernde Effekte von Biokohlen nachgewiesen (Biederman und Harpole, 2013; Blackwell et al., 2009), die vor allem in sauren und nährstoffarmen Böden in Kombination mit einer Düngergabe (Reddy et al., 2013) auftraten. Jedoch wurden die meisten Versuche in tropischen Umgebungen und auf tropischen Böden durchgeführt und können kaum auf gemäßigte Zonen übertragen werden. Forschungsaktivitäten mit Blick auf die Anwendung von Biokohlen in Böden der gemäßigten Zone haben in letzter Zeit zugenommen, weshalb langfristige Feldversuche immer noch rar sind (Gurwick et al., 2013). Baronti et al. (2010) zeigten bei der Anwendung von Pyrolyse-Biokohlen in Italien erhöhte Erträge von Hartweizen.

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt lag der Fokus der meisten Biokohle-Feldstudien auf der Bodenqualität und dem Pflanzenwachstum (Asai et al., 2009; Chan et al., 2007; Jones et al., 2012; Lehmann et al., 2003; Steiner et al., 2007; Vaccari et al., 2011; Van Zwieten et al., 2010). Die Meta-Analyse von Jeffery et al. (2011) zeigte eine insgesamt geringe (ca. 10 %) positive Wirkung auf die Pflanzenproduktivität bei der Ausbringung von Biokohlen in Böden.

Nach derzeitiger Kenntnis gibt es nur wenige Studien über die Effekte von Biokohlen auf Wachstum, Entwicklung, Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte und die Qualität von Kulturpflanzen (Chan et al., 2007; Jones et al., 2012; Schmidt et al., 2014; Tagoe et al., 2008; Tammeorg et al., 2014; Uzoma et al., 2011). Zum Beispiel berichteten Tammeorg et al. (2014), dass die Anzahl der Samen pro Pflanze bei der Ackerbohne und bei Rübsen signifikant höher war, wenn Biokohle angewendet wurde. Darüber hinaus war die Phosphoraufnahme und die Stickstoffnutzungseffizienz von Pflanzen nach der Anwendung von Biokohle im Boden erhöht (Reddy et al., 2013).

Neueste Studien haben gezeigt, dass die Ertragsreaktionen bei der Anwendung von Biokohle mit der Düngerversorgung (Blackwell et al., 2010; Guerena et al., 2013) sowie mit einer Anreicherung von Biokohle mit Nährstoffen (Gunes et al., 2014; Reverchon et al., 2014) zusammenhängen. Allerdings gibt es derzeit noch keine



Informationen über die Auswirkungen von Biokohlen aus Pyrolyse oder Hydrothermalen Carbonisierung (HTC). Ebenfalls ist bislang noch nichts über die Effekte der Biokohlen in Kombination mit oder ohne Gärrest und / oder Stickstoffdünger auf den Boden C- und N-Gehalt, die Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte und die Qualität von Winterweizen bekannt. Außerdem fehlen Informationen zu den Auswirkungen der Anwendung von Biokohlen auf sandigen Standorten in Deutschland.

Daher waren die Forschungsziele dieser Studie Untersuchungen zu den (I) Auswirkungen der verschiedenen Biokohlen behandelt mit oder ohne Gärrest, (II) Wechselwirkungen von N-Düngung und Biokohle und (III) Interaktionen von N-Düngung, Gärrestanwendung und Biokohle auf Wachstum, Entwicklung, Ertrag, Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte und Qualität von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) in einem Feldversuch. Vermutet wurde, dass abhängig von den unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und Produktionsverfahren, die Biokohleanwendung in Kombination mit Gärrest und / oder Stickstoffdüngung das Wachstum, die Entwicklung, Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte und Qualität von Winterweizen differenziert beeinflusst.

Ferner wurde angenommen, dass die Interaktionen von Biokohlen, Stickstoffdünger und die Fermentierung mit Gärrest positive Auswirkungen auf den Winterweizen hatten. Des Weiteren kann vermutet werden, dass durch die Anwendung von Biokohlen die Bodeneigenschaften des lehmigen Sandbodens verbessert werden und damit das Pflanzenwachstum erhöht wird.

## 2.2 Material und Methoden

### Herstellung und Eigenschaften der Biokohlen

Drei verschiedene Biokohlen und ein Gärrest wurden im Feldversuch verwendet. (1) Die Pyreg-Biokohle aus Siebresten der Holzhackschnitzelproduktion wurde durch kontinuierliche Pyrolyse (Pyreg) bei  $850 \pm 20$  °C für 30 min hergestellt. (2) Maissilage wurde durch kontinuierliche Pyrolyse bei 600 °C für 30 min (Pyro) verarbeitet. (3) Die dritte Biokohle wurde aus Maissilage durch Hydrothermale Carbonisierung (HTC) bei 210 °C und 23 bar für 8 h (HTC) hergestellt.

Der für die Fermentierung und Vermischung benötigte Gärrest stammte aus einer Festvergärung von Maissilage bei mesophilen Temperaturen (ca. 35 °C) (Mumme und Diakité, 2013).

Zusätzlich wurden die Pyro-Biokohle (Pyro\_ferm) und die HTC-Biokohle (HTC\_ferm) mit Gärrest fermentiert. Um geeignete Bedingungen für die methanogene Fermentation zu erhalten, wurde die Biokohle mit Gärresten und Wasser gemischt. Für die Fermentation wurde ein Verhältnis von 2:1 angestrebt. Die Mischungen wurden in FIBCs (Flexible Intermediate Bulk Container) gefüllt. Zur Schaffung anaerober Bedingungen wurden die Container in Silagefolie eingewickelt. Um mesophile Bedingungen zu gewährleisten wurden alle Container auf eine mit Wasser erhitze Betonplatte mit einer zusätzlichen Kunststoffplatte gestellt. Nach 29 Tagen wurde die Fermentation gestoppt und die FIBCs von der beheizten Betonplatte entfernt (Mumme und Diakité, 2013).

Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, Herstellungsprozesse und Prozessparameter unterschieden sich die Biokohlen in ihren chemischen Eigenschaften sowie in der BET-Oberfläche zum Teil erheblich (Tab. 1).

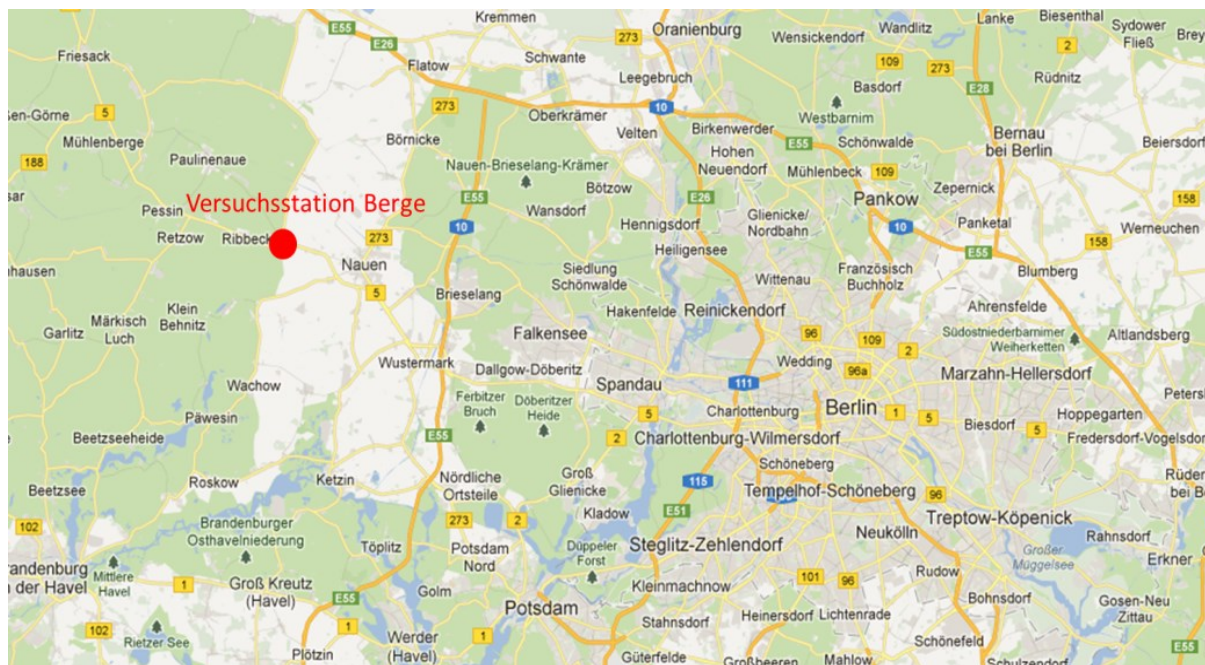
**Tabelle 1:** Chemische Eigenschaften der verwendeten Biokohlen (verändert nach Mumme und Diakité (2013)).

Parameter	Pyro-Biokohle	Pyreg-Biokohle	HTC-Biokohle	Gärrest	HTC_ferm	Pyro_ferm
TS (% FM)	92.85	55.09	47.39	23.60	32.80	30.03
Asche (% TM)	18.42	16.64	3.19	20.89	25.24	27.57
C <sub>org</sub> (% TM)	75.47	72.53	63.79	37.35	52.14	53.01
N <sub>t</sub> (% TM)	1.80	0.86	2.01	3.59	3.08	2.68
C:N-Verhältnis	41.93	84.80	31.76	10.40	16.93	19.78
pH Wert	9.89	9.35	5.25	8.26	7.03	9.52
P (g kg <sup>-1</sup> )	5.26	1.24	1.02	0.98	0.96	2.42
K (g kg <sup>-1</sup> )	31.12	7.18	3.58	4.72	2.66	7.63
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	4.74	1.68	0.21	0.74	0.44	1.37
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	8.93	14.45	1.28	3.37	2.40	5.12
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	11.00	1.70	1.75	0.87	1.28	4.41
BET-Oberfläche (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	1.69	179.6	8.27	1.51	5.83	1.73

Aus Tabelle 1 ist erkennbar, dass der organische Kohlenstoffgehalt (C<sub>org</sub>) der Biokohlen variiert. Fermentierte Biokohlen haben einen geringeren Kohlenstoffgehalt. Der Stickstoffgehalt ist in den fermentierten Biokohlen am höchsten, so dass diese das geringste C:N-Verhältnis aufwiesen. Pyrolysierte Biokohlen (Pyro, Pyreg) hatten einen deutlich höheren pH-Wert im Vergleich zur HTC-Biokohle. Die Gehalte an P, K, Mg und Fe waren in der Pyro-Biokohle im Vergleich zu den anderen Biokohlen deutlich erhöht.

## Versuchsstandort und Versuchsplan

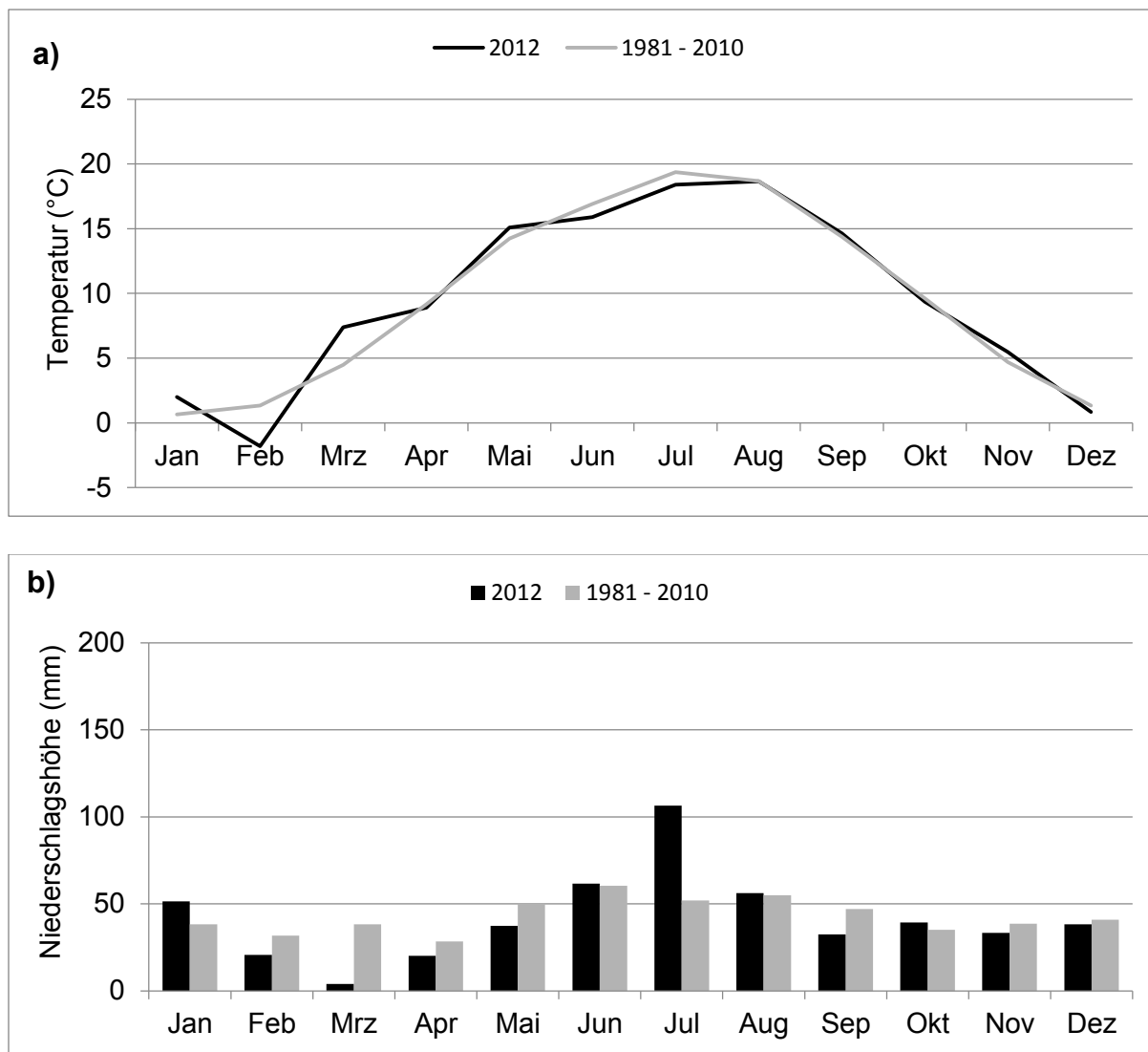
Der Feldversuch wurde in Berge (Kreis Havelland, Brandenburg) von der landwirtschaftlichen Versuchsstation des Instituts für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) durchgeführt (Land Brandenburg; 52° 37' 12" N, 12° 47' 42" E).



**Abbildung 2:** Standort der Versuchsstation des IASP in Berge bei Nauen.

Er wurde im Jahr 2012 angelegt und wird bis Herbst 2015 fortgesetzt. Die Jahresdurchschnittstemperatur an dieser Stelle beträgt 8,7 °C und der mittlere jährliche Niederschlag 503 mm.

Aus Abbildung 3a lässt sich erkennen, dass das Jahr 2012 durch einen im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010) kälteren Februar und wärmeren März sowie durch deutlich geringere Niederschlagshöhen im März gekennzeichnet war. Die Niederschlagshöhe im Juli verdoppelte sich im Vergleich zum langjährigen Mittel (Abb. 3b).



**Abbildung 3:** Temperaturverlauf (a) und Niederschlagsverteilung (b) des Jahres 2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010).

Die Bodenart auf der Versuchsfläche ist ein schwach lehmiger Sand (71 % Sand, 22 % Schluff und 7 % Ton) mit durchschnittlich 35 Bodenpunkten, einem pH-Wert von 6,0 und pflanzenverfügbaren Gehalten an P ( $P_{DL}$ ) und K ( $K_{DL}$ ) von 0,05 und 0,11 g  $kg^{-1}$ .

Der Feldversuch wurde in einer randomisierten Blockanlage mit 4 Wiederholungen und 16 Behandlungen angelegt. Abbildung A1 (Anhang) zeigt den Anlageplan des Feldversuchs. Die 16 Behandlungen wurden in jedem Block randomisiert.

Jede Parzelle hatte eine Größe von 4,5 x 10 m, von denen 4,5 x 9 m gedüngt wurden. Außerdem war der gedüngte Bereich in einen Untersuchungsbereich (1,5 x 9 m) und einen Erntebereich (1,5 x 9 m) aufgeteilt.

In dem Feldversuch wurden die drei Prüffaktoren Biokohle, Fermentierung (Gärrestanwendung) und Stickstoffdüngung mit den jeweiligen Faktorstufen untersucht (Abb. A1).

Prüffaktoren und Faktorstufen wurden aufgrund der verfügbaren Biokohlemengen nicht vollständig miteinander kombiniert. Die Kombinationen sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Kombinationen von Prüffaktoren und Faktorstufen im Feldversuch (GR = Gärrest).

<b>Faktor A:</b> Kontrolle	<b>Biokohle</b> Pyro	HTC	Pyreg	<b>Faktor B:</b> Fermentierung	<b>Faktor C:</b> Stickstoff (%)
x (GR)	-	-	x (GR)	ja	0
x	-	-	x	nein	0
x	-	-	x	nein	50
x (GR)	x	x	x (GR)	ja	100
x	x	x	x	nein	100
x	-	-	x	nein	130

Im September 2012 wurden die Biokohlen in einer Menge von  $7,7 \text{ t ha}^{-1}$  Biokohle-C ausgebracht. Die Höhe des Gärrest-C in Behandlungen Pyreg + Gärrest und Kontrolle + Gärrest betrug  $3,85 \text{ t ha}^{-1}$  entsprechend des Gärrest-C:Biokohle-C-Verhältnisses von 1:2 der fermentierten Biokohlen. Nach der Ausbringung der Biokohlen wurde gepflügt und im Oktober der Winterweizen (*Triticum aestivum* L., cv. Akteur, Deutsche Saatveredlung AG, Deutschland) gesät. Im April und Mai 2013 folgte die erste und zweite N-Düngung (KAS 27 % N) in den Raten von 0, 37.5, 75, 97.5  $\text{kg ha}^{-1}$  N bzw. entsprechend 0 % ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$  N), 50 % ( $75 \text{ kg ha}^{-1}$  N), 100 % ( $150 \text{ kg ha}^{-1}$  N) und 130 % ( $190 \text{ kg ha}^{-1}$  N) der Pflanzenansprüche.

### Bodenanalyse

Zu Beginn des Feldversuchs (vor der Ausbringung von Biokohle, Gärrest und N-Dünger) sowie nach der Ernte von Winterweizen wurden pro Parzelle Bodenproben entnommen. Dazu wurden je 5 Einstiche pro Parzelle (0-20 cm) zu einer Mischprobe zusammengeführt und luftgetrocknet. In den Bodenproben wurden Gesamtkohlenstoff ( $C_t$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) doppelt durch trockene Verbrennung mit einem Vario MAX CNS Elementaranalysators (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland) bestimmt.

## Wachstum, Entwicklung, Ertrag, Ertragsstruktur und Qualität

In der Vegetationsperiode wurden das Wachstum und die Entwicklung des Winterweizens auf der Grundlage der BBCH-Skala (Meier, 1997) erfasst, während die Pflanzenhöhe mit einem Zollstock an fünf Terminen zwischen Mitte Mai 2013 und Ende Juni 2013 gemessen wurde. Die Blattgrüneinheiten wurden mithilfe des YARA N-Testers (YARA GmbH & Co. KG, Deutschland) bestimmt. Nach der Ernte des Winterweizens im August 2013 wurden die Frisch- und Trockenmassen des Strohs und der Getreidekörner ermittelt. Von jeder Variante und den Wiederholungen wurde ein Teil des Strohs bei 60 °C getrocknet und auf 1 mm gemahlen, um Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K) und Magnesium (Mg) zu bestimmen. N wurde mit Hilfe eines Vario MAX CNS Elementaranalysators (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland) bestimmt. P, K und Mg wurden durch Mikrowellenextraktion (Mars 6, CEM, Deutschland) gelöst und unter Verwendung eines ICP-OES (Thermo Scientific, USA) analysiert. Von jeder Parzelle wurde ein Teil der Körner ebenfalls auf 1 mm gemahlen und die Nährstoffgehalte wie zuvor beschrieben analysiert (N, P, K, Mg). Außerdem wurden die Qualitätsparameter Rohproteingehalt, Fallzahl und Sedimentationswert untersucht. Mit dem N-Gehalt der Körner konnte der Rohproteingehalt berechnet werden ( $N \cdot 5.7$ ). Fallzahl (Maß für die Amylaseaktivität) (Perten, 1964) und Sedimentationswert nach ZELENY (Zabel, 1965) wurden als Maß für die Qualität des Backweizens getestet. Für die Ertragskomponenten wurden pro Parzelle 3 x 1 m Ähren gezählt und die Ähren pro  $m^{-2}$  berechnet. Die Kornzahl Ähre<sup>-1</sup> wurde berechnet, indem die Körner  $m^{-2}$  durch die Ähren  $m^{-2}$  dividiert wurden. Für das Tausendkorngewicht wurden 1000 Körner mit einem halbautomatischen Zähler abgezählt und jeweils das Gewicht der 1000 Körner bestimmt. Als Maßstab für die äußere Qualität von Weizen wurde das Hektolitergewicht (Schmorl, 1937) untersucht.

## Statistische Analyse

Der dreifaktorielle Versuchsaufbau war die Grundlage für die Untersuchungen der Auswirkungen von Biokohleanwendungen auf bodenchemische Eigenschaften sowie auf Wachstum, Entwicklung, Ertrag, Nährstoffgehalte und die Qualität der Kulturpflanzen. Die statistische Auswertung erfolgte in den verschiedenen Datensätzen durch die Bildung orthogonaler Kerne. Der 1. orthogonale Kern bestand aus den Faktoren A: Biokohle und B: Fermentierung (alle bei 100 % N-Düngung). Im 2. orthogonalen Kern wurde die Kontrolle mit der Pyreg-Biokohle bei

unterschiedlichen Stickstoffdüngergaben verglichen. Der 3. gebildete orthogonale Kern zur statistischen Auswertung bestand aus den Faktoren A: Biokohle (Kontrolle, Pyreg), B: Fermentierung (ohne oder mit Gärrest) und C: N-Düngung (0 % und 100 %). Statistische Analysen wurden mit SAS-Software (SAS Version 9.4; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt. Mittelwerte und Standardabweichungen wurden für  $C_t$ ,  $N_t$ , die Ertragsstruktur von Winterweizen, Nährstoffgehalte von Winterweizen im Stroh und Korn, und die Qualität der Winterweizenkörner von 4 Wiederholungen berechnet. Datensätze wurden durch die zweifaktorielle Varianzanalyse (1. orthogonaler Kern und 2. orthogonaler Kern) und dreifaktorielle Varianzanalyse (3. orthogonaler Kern) ausgewertet. Mittelwertvergleiche wurden mit dem Tukey's HSD Test durchgeführt und signifikante Effekte für  $P \leq 0.05$  angenommen. Das SAS-Makro %MULT wurde verwendet, um die Buchstabenanzeige für signifikante Unterschiede (Piepho, 2012) zu erhalten.

## 2.3 Ergebnisse

### Veränderung der Boden C- und N-Gehalte

Die Bodenkohlenstoffgehalte lagen vor der Ausbringung der Biokohlen zwischen 0.67 und 0.83 %, während nach der Ausbringung der Biokohlen (September 2012) und der Ernte des Winterweizens im Oktober 2013 die Gehalte zwischen 0.89 und 1.20 % variierten. Der Einsatz der Biokohlen führte zu einer Erhöhung der Kohlenstoffgehalte in allen Behandlungen. Aus Tabelle 3 ist erkennbar, dass die Kohlenstoffgehalte nach der Ernte in allen Behandlungen höher waren als vor dem Beginn des Versuchs. Durch die Zugabe der Biokohlen konnte ebenfalls eine Erhöhung der Stickstoffgehalte von durchschnittlich 0.07 % vor der Ausbringung auf 0.08 % nach der Ernte erreicht werden (Tab. 3).



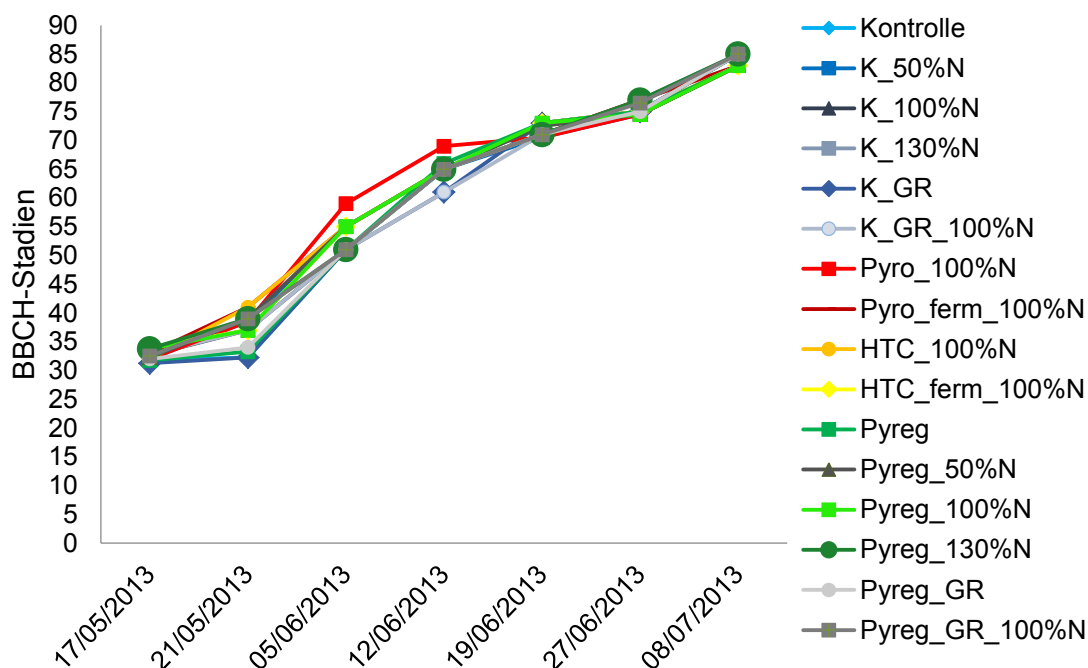
**Tabelle 3:** Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte vor Versuchsbeginn und nach der Ernte des Winterweizens (MW  $\pm$  SD).

Behandlung	C <sub>t</sub>	C <sub>t</sub>	N <sub>t</sub>	N <sub>t</sub>
	vor Versuchsbeginn (%)	nach der Ernte (%)	vor Versuchsbeginn (%)	nach der Ernte (%)
Kontrolle	0.72 $\pm$ 0.08	0.89 $\pm$ 0.16	0.07 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.01
K_50%N	0.76 $\pm$ 0.09	0.89 $\pm$ 0.16	0.07 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01
K_100%N	0.74 $\pm$ 0.14	0.90 $\pm$ 0.08	0.07 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.00
K_130%N	0.83 $\pm$ 0.10	0.89 $\pm$ 0.12	0.08 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01
K_GR	0.75 $\pm$ 0.11	0.89 $\pm$ 0.17	0.08 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.02
K_GR_100%N	0.74 $\pm$ 0.11	0.93 $\pm$ 0.14	0.07 $\pm$ 0.02	0.09 $\pm$ 0.01
Pyro_100%N	0.69 $\pm$ 0.11	0.94 $\pm$ 0.08	0.07 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.01
Pyro_ferm_100%N	0.67 $\pm$ 0.08	0.96 $\pm$ 0.25	0.06 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.02
HTC_100%N	0.71 $\pm$ 0.14	0.98 $\pm$ 0.15	0.07 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.01
HTC_ferm_100%N	0.77 $\pm$ 0.14	0.94 $\pm$ 0.18	0.07 $\pm$ 0.00	0.08 $\pm$ 0.02
Pyreg	0.67 $\pm$ 0.11	0.92 $\pm$ 0.10	0.06 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.01
Pyreg_50%N	0.74 $\pm$ 0.09	0.93 $\pm$ 0.16	0.07 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01
Pyreg_100%N	0.70 $\pm$ 0.10	0.92 $\pm$ 0.14	0.06 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.01
Pyreg_130%N	0.79 $\pm$ 0.04	1.12 $\pm$ 0.21	0.07 $\pm$ 0.02	0.08 $\pm$ 0.01
Pyreg_GR	0.74 $\pm$ 0.10	1.06 $\pm$ 0.19	0.07 $\pm$ 0.02	0.09 $\pm$ 0.01
Pyreg_GR_100%N	0.73 $\pm$ 0.10	1.20 $\pm$ 0.29	0.07 $\pm$ 0.02	0.09 $\pm$ 0.01

Durch die Ausbringung der Pyreg-Biokohle wurde der C<sub>t</sub>-Gehalt positiv beeinflusst. Gärrest und Stickstoffdüngung hatten keinen Effekt auf die C<sub>t</sub>-Gehalte. Der Stickstoffgehalt wurde zur Zeit der Ernte des Winterweizens nicht beeinflusst.

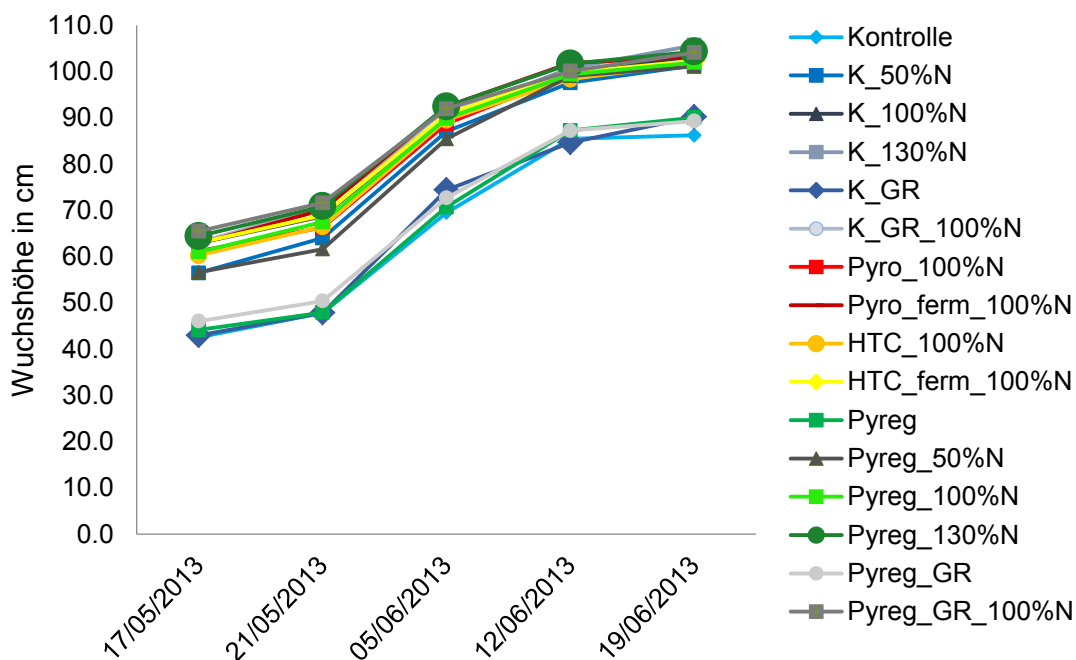
#### Wachstum und Entwicklung

Während der Vegetationsperiode konnten keine Unterschiede in der Entwicklung (BBCH-Code; Meier (1997)) festgestellt werden (Abb. 4).



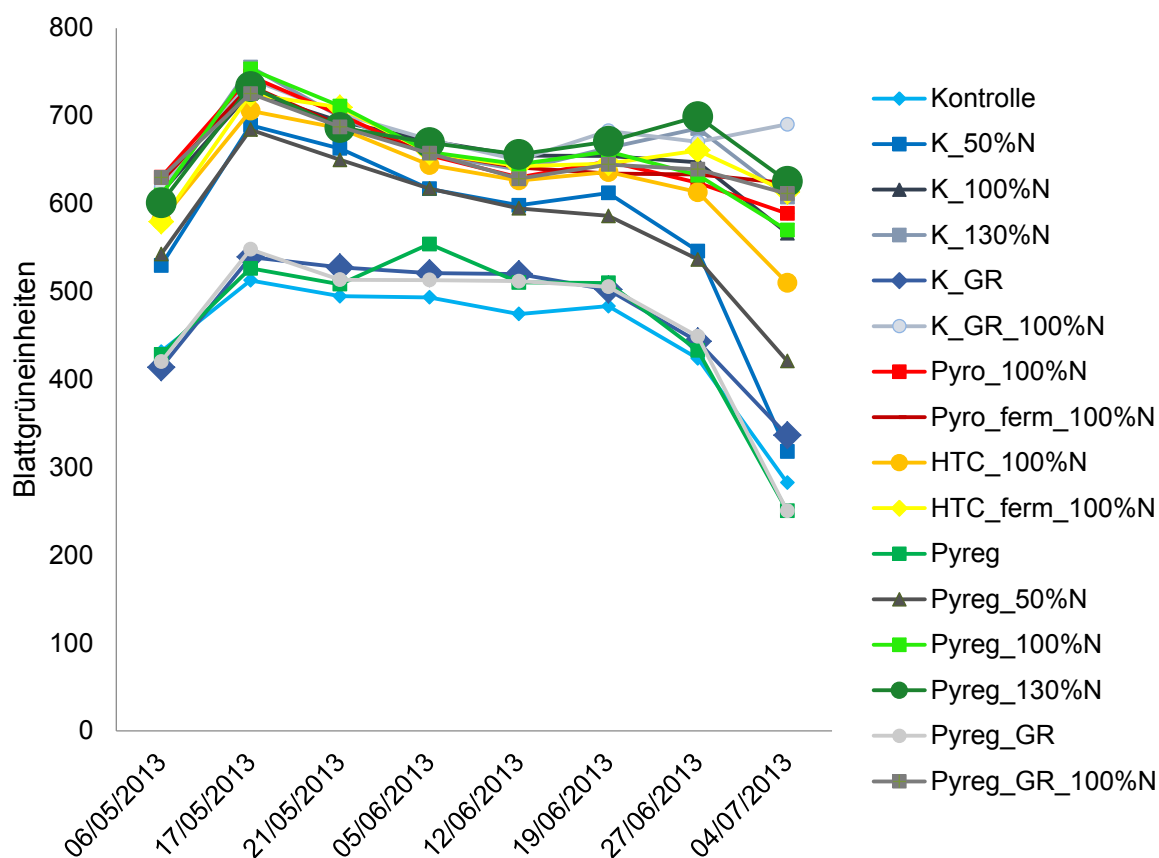
**Abbildung 4:** Entwicklung von Winterweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung nach BBCH-Stadien (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest).

Die Wuchshöhen unterschieden sich nur zwischen den nicht gedüngten und gedüngten Varianten signifikant. Innerhalb der nicht gedüngten und der gedüngten Gruppe gab es keine Unterschiede (Abb. 5).



**Abbildung 5:** Entwicklung der Wuchshöhe (cm) von Winterweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest).

Im Vergleich zu der Entwicklung der Wuchshöhe zeigten die gemessenen Blattgrüneinheiten ein differenzierteres Ergebnis (Abb. 6).

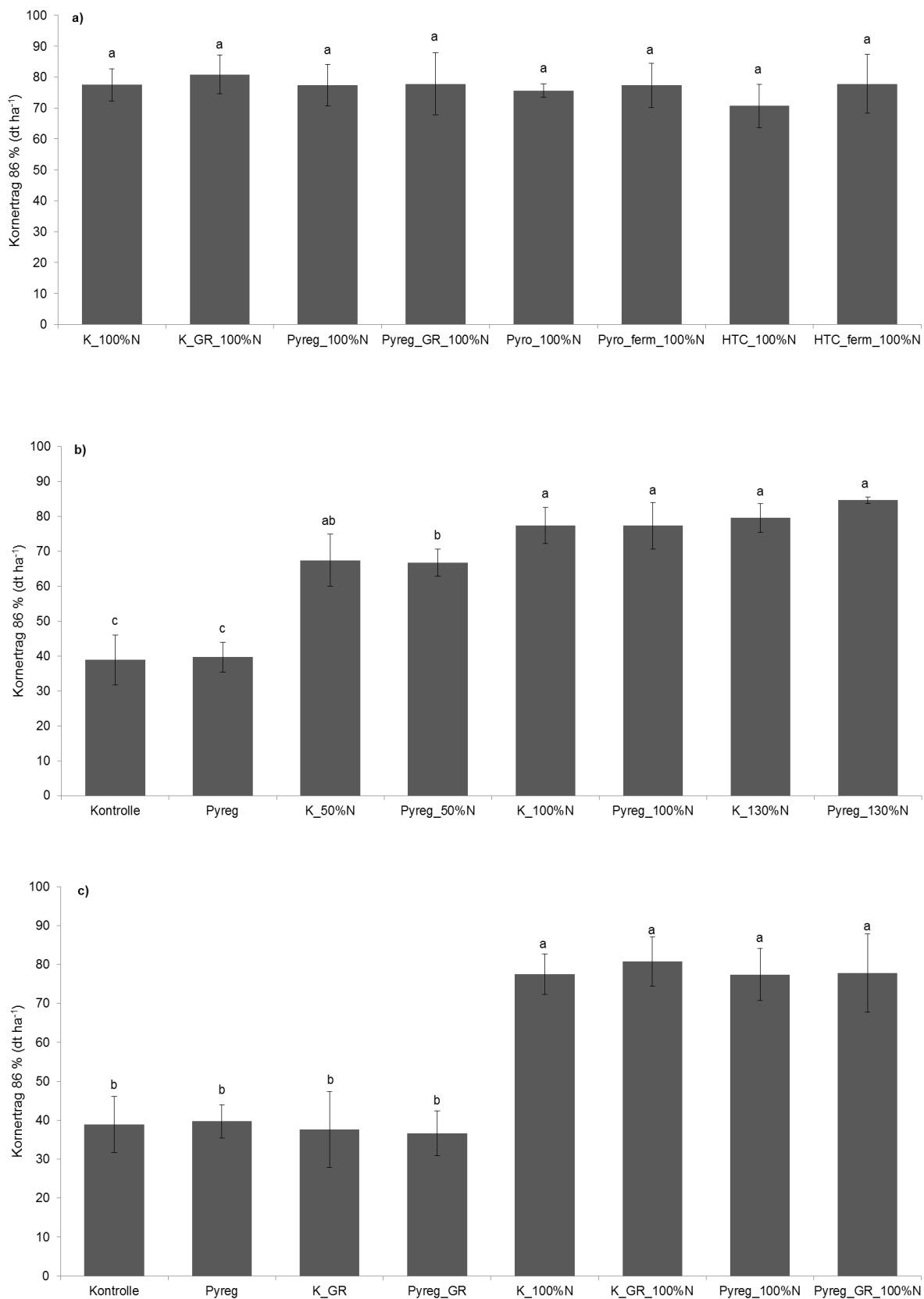


**Abbildung 6:** Verlauf der Blattgrüneinheiten von Winterweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest).

Während die nicht gedüngten Behandlungen die geringsten Werte aufwiesen, differenzierten sich die 50 % N Varianten von den 100 und 130 % N Varianten. Es ließ sich kein Einfluss der Biokohle auf die BBCH-Stadien, Wuchshöhe und Blattgrüneinheiten feststellen.

#### Winterweizenertrag

Die Abbildung 7 zeigt die Winterweizenerträge sortiert nach orthogonalen Kernen. Im ersten orthogonalen Kern (Abb. 7a) lagen die Erträge im Durchschnitt bei 75 dt ha<sup>-1</sup>. Die Erträge im zweiten orthogonalen Kern variierten zwischen ca. 40 dt ha<sup>-1</sup> in den nicht gedüngten Varianten und über 80 dt ha<sup>-1</sup> in den höchstgedüngten Varianten (Abb. 7b).



**Abbildung 7:** Kornerträge von Winterweizen (dt ha<sup>-1</sup>, 86 % TS) des ersten (a), zweiten (b) und dritten (c) orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb der orthogonalen Kerne (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Im ersten orthogonalen Kern (Biokohle, GR) (Abb. 7a) zeigte der Kornertrag keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen. Die unterschiedlichen Biokohlen hatten weder nachgewiesene positive noch negative Effekte auf den Kornertrag. Die Stickstoffdüngung spielte im zweiten orthogonalen Kern eine wesentliche Rolle. Insgesamt ist erkennbar, dass mit steigender Stickstoffdüngung der Kornertrag zunimmt. Zwischen den Behandlungen mit 100 % N und denen mit 130 % N konnten keine Unterschiede nachgewiesen werden (Abb. 7b). Im dritten orthogonalen Kern mit den Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoffdüngung hatten die Varianten mit Stickstoff (100 % N) signifikant höhere Erträge als die nicht gedüngten Varianten. Weder die Biokohle noch die Anwendung von Gärrest zeigten einen Einfluss auf den Kornertrag (Abb. 7c).

#### Ertragsstruktur, Nährstoffe und Qualität

Die Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte im Korn und Stroh sowie die Kornqualität wurden für alle Behandlungen ermittelt und jeweils in den orthogonalen Kernen ausgewertet.

Bei der Ertragsstruktur im ersten orthogonalen Kern lagen die mittleren Werte bei 477 Ähren  $\text{m}^{-2}$ , 34.3 Körner  $\text{Ähre}^{-1}$ , 46.8 g Tausendkorngewicht und 80.1  $\text{kg hl}^{-1}$  Hektolitergewicht. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen und weder Haupt- noch Wechselwirkungen. In ähnlicher Weise gab es ebenfalls keine Unterschiede in den Nährstoffgehalten (außer  $K_{\text{Stroh}}$ ) des Weizenstrohs mit durchschnittlichen Gehalten von 3.9  $\text{g kg}^{-1} N_{\text{Stroh}}$ , 0.69  $\text{g kg}^{-1} P_{\text{Stroh}}$  und 0.64  $\text{g kg}^{-1} Mg_{\text{Stroh}}$  (Tab. A1). Der Kaliumgehalt im Stroh wurde signifikant durch den Gärrest beeinflusst (Tab. 4).

**Tabelle 4:** Nährstoffgehalte im Weizenstroh und –korn, Rohproteingehalt und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Gärrest und Interaktionen des ersten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung	K <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>Korn</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	K <sub>Korn</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>Korn</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Rohprotein- gehalt (% TM)	
K_100%N	7.75±0.37a	4.17±0.19a	4.28±0.18a	1.32±0.06a	12.59±0.53a	
K_GR_100%N	8.37±1.24a	4.09±0.12a	4.10±0.25a	1.28±0.06a	13.04±0.12a	
Pyro_100%N	7.01±0.38a	4.39±0.16a	4.50±0.08a	1.42±0.08a	12.38±0.32a	
Pyro_ferm_100%N	8.58±0.89a	4.48±0.16a	4.45±0.18a	1.43±0.04a	12.98±0.39a	
HTC_100%N	7.67±0.95a	4.22±0.24a	4.27±0.20a	1.35±0.06a	12.29±0.35a	
HTC_ferm_100%N	7.87±0.60a	4.08±0.21a	4.16±0.23a	1.28±0.10a	12.66±0.45a	
Pyreg_100%N	7.86±0.77a	4.07±0.19a	4.20±0.25a	1.27±0.08a	11.02±0.47a	
Pyreg_GR_100%N	8.24±0.29a	4.24±0.21a	4.19±0.12a	1.31±0.09a	13.08±0.55a	
	df	P-Werte				
Biokohle	3	0.815	<b>0.016</b>	<b>0.025</b>	<b>0.007</b>	0.555
Gärrest	1	<b>0.022</b>	0.888	0.25	0.51	<b>0.002</b>
Biokohle*Gärrest	3	0.343	0.423	0.851	0.499	0.754

Die Nährstoffgehalte im Korn (P, K, Mg) wurden signifikant durch die Hauptwirkung Biokohle beeinflusst. Die Anwendung von Pyro-Biokohle bewirkte höhere P-, K- und Mg-Gehalte im Weizenkorn (Tab. 4). Die Rohproteingehalte lagen zwischen 11.02 und 13.08 % TM und wurden durch die Hauptwirkung Gärrest beeinflusst. Die Fallzahl und der Sedimentationswert lagen im Durchschnitt bei 442 sec und 14.3 ml (Tab. A2). Weder die Biokohlen noch der Gärrest hatten einen Einfluss auf die Fallzahl und den Sedimentationswert. Insgesamt wurden keine signifikanten Interaktionen im ersten orthogonalen Kern gefunden.

Alle untersuchten Variablen im zweiten orthogonalen Kern (Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte, Qualität) wurden von der Stickstoffdüngung signifikant beeinflusst. Die Biokohle hatte keinen Einfluss auf die Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte vom Weizenstroh,  $K_{\text{Korn}}$ ,  $Mg_{\text{Korn}}$  und Rohproteingehalte (Tab. A3, A4).  $P_{\text{Korn}}$  und die

Fallzahl wurden durch die Anwendung von Pyreg-Biokohle positiv beeinflusst, allerdings gab es keine signifikanten Interaktionen (Tab. 5). Der Sedimentationswert wurde durch die Hauptfaktoren Biokohle und Düngung sowie deren Interaktion beeinflusst. Dabei hatte die Kontrolle den geringsten Sedimentationswert im Vergleich zu den anderen Behandlungen (Tab. 5).

**Tabelle 5:**  $P_{\text{Korn}}$ , Fallzahl, Sedimentationswert und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Stickstoff und Interaktionen des zweiten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung	$P_{\text{Korn}}$ (g kg <sup>-1</sup> )	Fallzahl (sec)	Sedimentations- wert (ml)
Kontrolle	4.39±0.43a	374.13±31.27c	9.25±2.18b
Pyreg	4.51±0.24a	409.00±13.87bc	13.69±0.80a
K_50%N	4.03±0.25a	394.63±20.28bc	12.94±0.31a
Pyreg_50%N	4.56±0.18a	404.63±23.54bc	14.31±0.24a
K_100%N	4.17±0.19a	429.50±21.93b	13.75±0.65a
Pyreg_100%N	4.07±0.19a	443.38±14.92ab	14.19±0.55a
K_130%N	4.01±0.10a	431.00±41.03b	14.19±1.07a
Pyreg_130%N	4.17±0.16a	461.13±12.17a	14.94±0.31a
	df	P-Werte	
Biokohle	1	<b>0.048</b>	<b>0.013</b>
Stickstoff	3	<b>0.025</b>	<b>&lt;0.001</b>
Biokohle*Stickstoff	3	0.108	<b>0.656</b>

Im dritten orthogonalen Kern wurden die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff sowie deren Interaktionen geprüft. Ähnlich zum zweiten orthogonalen Kern hatte die Stickstoffdüngung in allen geprüften Variablen einen signifikanten Einfluss (Tab. A5, A6). Das Hektolitergewicht sowie die Fallzahl und der Sedimentationswert wurden durch die Gärrestanwendung beeinflusst (Tab. 6). Diese Faktoren, mit Ausnahme des Hektolitergewichts, wurden ebenfalls durch die Anwendung von Biokohle bedingt.

**Tabelle 6:** Hektolitergewicht, Fallzahl, Sedimentationswert und die P-Werte für die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff und Interaktionen des dritten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung		Hektolitergewicht (kg hl <sup>-1</sup> )	Fallzahl (sec)	Sedimentationswert (ml)
Kontrolle		78.98 $\pm$ 0.65b	374.13 $\pm$ 31.27b	9.25 $\pm$ 2.18b
Pyreg		78.94 $\pm$ 0.66b	409.00 $\pm$ 13.87ab	13.69 $\pm$ 0.80a
K_GR		79.31 $\pm$ 0.32b	411.00 $\pm$ 15.95ab	13.19 $\pm$ 0.63a
Pyreg_GR		79.32 $\pm$ 0.27b	410.13 $\pm$ 3.33ab	13.50 $\pm$ 0.71a
K_100%N		80.09 $\pm$ 0.47a	429.50 $\pm$ 21.93a	13.75 $\pm$ 0.65a
Pyreg_100%N		79.98 $\pm$ 0.13a	443.38 $\pm$ 14.92a	14.19 $\pm$ 0.55a
K_GR_100%N		80.35 $\pm$ 0.32a	442.88 $\pm$ 27.55a	14.31 $\pm$ 0.38a
Pyreg_GR_100%N		80.20 $\pm$ 0.47a	465.38 $\pm$ 13.24a	14.75 $\pm$ 0.54a
	df		P-Werte	
Biokohle	1	0.615	<b>0.018</b>	<b>&lt;0.001</b>
Gärrest	1	<b>0.043</b>	<b>0.014</b>	<b>0.002</b>
Biokohle*Gärrest	1	0.994	0.336	<b>0.008</b>
Stickstoff	1	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
Biokohle*Stickstoff	1	0.703	0.932	<b>0.012</b>
Gärrest*Stickstoff	1	0.672	0.925	0.078
BC*GR*N	1	0.873	0.122	<b>0.008</b>

Die Interaktion zwischen Biokohle und Stickstoff hatte einen Einfluss auf den Sedimentationswert. Der Sedimentationswert wurde außerdem durch die Interaktion zwischen Biokohle und Gärrest sowie die dreifache Interaktion zwischen Biokohle, Gärrest und Stickstoff beeinflusst (Tab. 6).



## 2.4 Diskussion

### Effekt der Biokohlen auf chemische Bodeneigenschaften

Die Ergebnisse der Bodenprobenahme nach der Ernte des Winterweizens zeigten sowohl Erhöhungen der Gesamtkohlenstoffgehalte in allen Varianten sowie Erhöhungen der Gesamtstickstoffgehalte. In der Literatur sind Untersuchungen bekannt, die auf eine Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehaltes und damit auch des Gesamtkohlenstoffgehaltes durch die Anwendung von Biokohlen hinweisen (Chan et al., 2007; Schulz und Glaser, 2012). Jones et al. (2012) fanden in einem dreijährigen Feldversuch im 2. Jahr nach der Ausbringung von Biokohle einen höheren Kohlenstoffgehalt als im 3. Jahr nach der Ausbringung. Dennoch waren die Kohlenstoffgehalte in beiden Jahren in den Biokohlevarianten ( $50 \text{ t ha}^{-1}$ ) signifikant höher im Vergleich zur Kontrolle. Außerdem zeigten die Autoren, dass die Biokohleanwendung ( $50 \text{ t ha}^{-1}$ ) keine Auswirkungen auf den Gesamtstickstoffgehalt hatte. Da in den vorgestellten Ergebnissen nur ein Jahr untersucht wurde, kann nicht auf die mittelfristige Veränderung der Boden C- und N-Gehalte geschlossen werden. Zudem sind die Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalte in den Varianten ohne Biokohle ebenfalls nach der Ernte des Winterweizens höher als vor der Ausbringung der Biokohlen. Die Gesamtstickstoffgehalte unterscheiden sich zwischen der Kontrolle und den Biokohlevarianten nicht. Daraus kann geschlossen werden, dass die Biokohlen im Feldversuch die Stickstoffgehalte im Boden nicht beeinflussen.

### Effekt der Biokohlen und deren Behandlung auf Wachstum, Entwicklung und Ertrag von Winterweizen

Die Ergebnisse zur Entwicklung des Winterweizens im Feldversuchs zeigten keine Unterschiede zwischen den Behandlungen (mit der Ausnahme von Pyro\_100 % N am 05.06.2013 und 12.06.2013). Die getesteten Biokohlen hatten somit keinen Einfluss auf die Entwicklung von Winterweizen.

Im Vergleich zu den Entwicklungsstadien gab es erkennbare Unterschiede in der Wuchshöhe von Winterweizen und den Blattgrüneinheiten, die mit dem YARA N-Tester gemessen wurden. Die Pflanzen in den Varianten, die nicht gedüngt wurden, hatten eine signifikant geringere Wuchshöhe als die Pflanzen in den gedüngten Varianten. Die Blattgrüneinheiten waren je nach Stickstoffdüngergabe gruppiert und zeigten keine Unterschiede zwischen den Varianten in den Gruppen

ohne Düngung, 50 % N, 100 % N und 130 % N. Diese Gruppierung war angesichts der Gerätefunktion des YARA N-Testers zu erwarten. Es gab im Feldversuch keinen Einfluss der Biokohlen auf Wuchshöhe und Blattgrüneinheiten. Jones et al. (2012) fanden keine Effekte unterschiedlicher Biokohlemengen auf die Wuchshöhe von Mais. Schulz und Glaser (2012) zeigten eine signifikant höhere Pflanzenhöhe von Hafer (*Avena sativa* L.) in der Behandlung Biokohle+Kompost im Vergleich zur reinen Biokohlebehandlung. Sie vermuteten, dass das Ergebnis durch die höheren Ca- und Mg-Gehalte des Komposts erklärt werden kann. In der vorliegenden Studie wurde allerdings ein Gärrest mit geringeren Ca- und Mg-Gehalten im Vergleich zum Kompost aus der Studie von Schulz und Glaser (2012) verwendet.

Der Kornertrag des Winterweizens wurde durch den Stickstoffdünger positiv beeinflusst. Die verwendeten Biokohlen zeigten weder positive noch negative Einflüsse auf den Ertrag von Winterweizen in den orthogonalen Kernen. Ähnliche Ergebnisse wurden für Mais in gemäßigten (Guerena et al., 2013; Jones et al., 2012) und nördlichen Regionen (Tammeorg et al., 2014) gefunden. Eine Studie mit Biokohlemengen bis zu 30 t ha<sup>-1</sup> zeigte, dass erhöhte Pflanzenerträge auf fruchtbaren Böden nicht zu erwarten sind (Guerena et al., 2013).

Die Kornerträge des Winterweizens im ersten orthogonalen Kern zeigten, dass die Behandlung der Biokohlen mit Gärrest keine signifikanten Unterschiede aufwies. Im Gegensatz dazu berichteten Schmidt et al. (2014) in einem Vergleich der Anwendung von Biokohle und einer Biokohle+Kompost Mischung in Weinböden, dass Biokohle-Kompost und Kompost in den ersten beiden Jahren positive Effekte auf Pflanzenwachstum und Qualitätsparameter von Weintrauben im Vergleich zur Biokohle und Kontrolle hatten. Im dritten Jahr gab es allerdings keine Unterschiede zwischen den Behandlungen. Das Verhältnis bei der Fermentierung der Biokohlen war 2:1 (Biokohle:Gärrest). Möglich wäre, dass die Effekte der fermentierten Biokohlen bei einer Änderung des Verhältnisses (z.B. 1:1) zunehmen.

#### Effekt der Biokohlen auf Ertragsstruktur, Nährstoffe und Qualität von Winterweizen

Im ersten orthogonalen Kern zeigte die Biokohleanwendung in Kombination mit oder ohne Gärrest weder positive noch negative Effekte auf die Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte im Stroh und die Kornqualität von Winterweizen. Ähnliche Ergebnisse wurden von Tammeorg et al. (2014) berichtet, die den Einfluss von Fichten- und Pinienbiokohlen auf die Ertragsstruktur und Qualität von Weizen

untersuchten. Nur im zweiten Jahr wurde von einer Erhöhung der Anzahl der Körner Pflanze<sup>-1</sup> durch die Biokohleanwendung berichtet.

In der vorliegenden Studie wurde eine Erhöhung des Kaliumgehaltes im Stroh durch die Anwendung von Gärrest gefunden, der mit dem höheren Kaliumgehalt des Gärrestes sowie der fermentierten Biokohlen zusammenhängen könnte (Tab. 1).

Der Rohproteingehalt wurde ebenfalls durch den Gärrest positiv beeinflusst. Da der Rohproteingehalt hauptsächlich von der Stickstoffmenge beeinflusst wird (MacGregor et al., 1961; Ozturk et al., 2003; Terman et al., 1969), kann angenommen werden, dass der hohe Stickstoffgehalt im Gärrest der Grund für den positiven Effekt ist. Die Nährstoffgehalte im Korn wurden positiv durch die Anwendung von Biokohlen beeinflusst. Die Gehalte von P, K und Mg in den Winterweizenkörnern waren in der Behandlung mit Pyro-Biokohle signifikant höher im Vergleich zu den anderen Biokohlen, was wiederum mit den hohen Nährstoffgehalten der Pyro-Biokohle (Tab. 1) zusammenhängt.

Der Effekt der Stickstoffdüngung auf Ertrag, Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte und die Qualität von Weizen ist weitgehend bekannt (Mitchell et al., 1993; Tammeorg et al., 2014). Im zweiten orthogonalen Kern wurden neben der Beeinflussung der untersuchten Parameter durch die Stickstoffdüngung, Effekte der Biokohlen auf  $P_{\text{Korn}}$  festgestellt. Die höheren Phosphorgehalte der Körner in den Behandlungen mit Pyreg-Biokohle könnten mit einem erhöhten Phosphorgehalt der Pyreg-Biokohle zusammenhängen.

Die Fallzahl wurde ebenfalls durch die Anwendung der Biokohlen erhöht. Generell sind Fallzahlen über 320 sec schlecht für die Backfähigkeit, d.h. der Effekt der Biokohlen war eher negativ. Gründe für die hohe Fallzahl kann zum einen die Sorte sein. Laut Angaben des Züchters ist die Winterweizensorte Akteur mit einer hohen bis sehr hohen Fallzahl eingestuft (DSV, 2014). Außerdem haben die Witterung, die Enzymaktivität sowie der Feuchtegehalt der Körner einen Einfluss auf die Fallzahl (DWD, 2014; Wellie-Stephan, 2011). Möglicherweise waren die Körner in den Behandlungen mit Pyreg-Biokohle zur Ernte wässriger. Die signifikante Interaktion von Biokohle und Stickstoff auf den Sedimentationswert zeigte die positive Wirkung der Kombination von Biokohle und Stickstoff. Chan et al. (2007) zeigten ebenfalls signifikante Interaktionen von Biokohle und Stickstoff auf die Nährstoffgehalte von Radieschen.

Im dritten orthogonalen Kern wurden die Hauptfaktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoffdünger sowie deren Wechselwirkungen betrachtet. Der Gärrest zeigte positive Effekte auf Hektolitergewicht, Fallzahl und den Sedimentationswert. Im ersten orthogonalen Kern, wo ebenfalls die Anwendung von Gärrest untersucht wurde, gab es keinen Einfluss auf die genannten Parameter. Ähnlich zum zweiten orthogonalen Kern hatte in dem dritten orthogonalen Kern der Stickstoff signifikante Hauptwirkungen auf alle untersuchten Parameter. Das Hektolitergewicht wurde als Maß für die äußere Qualität der Weizenkörner bestimmt. Hektolitergewichte von weniger als  $78 \text{ kg hl}^{-1}$  können zu Abzügen bei Mühlen führen (YARA, 2014), da die äußere Qualität durch Verschmutzung oder Kornmissbildungen gemindert ist. Generell ist die äußere Qualität der Weizenkörner in der vorliegenden Studie als gut einzustufen.

Der Sedimentationswert wurde durch die Wechselwirkung aller drei Faktoren im dritten orthogonalen Kern beeinflusst. Die geringsten Werte wurden in der Behandlung ohne Biokohle, Gärrest und Stickstoffdünger gefunden. Unabhängig von den im Boden angewendeten Materialien wurden niedrige Sedimentationswerte gefunden. Sedimentationswerte unter 20 ml haben negative Effekte auf die Backqualität des Mehls (Raiffeisen, 2014). Die Fallzahl wurde durch alle Hauptwirkungen beeinflusst. Die Wirkung von Gärrest lässt sich möglicherweise durch die N- und K-Gehalte im Gärrest erklären (Wellie-Stephan, 2011).

## 2.5 Schlussfolgerungen

Der Feldversuch zeigte nach einem Jahr die differenzierten Wirkungen der Biokohleanwendung auf die Bodenchemie, Wachstum, Entwicklung, Ertrag, Ertragsstruktur, Nährelementgehalte und Qualität von Winterweizen. Die Kohlenstoffgehalte des Bodens wurden durch die Anwendung der Biokohlen erhöht. Wachstum, Entwicklung, Ertrag und Ertragsstruktur wurden hauptsächlich durch die Stickstoffdüngung beeinflusst. Die Nährstoffe in den Biokohlen können pflanzenverfügbar sein und die Nährstoffgehalte der Pflanzen und Körner erhöhen. Durch die hohe Fallzahl und den geringen Sedimentationswert ist die Backqualität des Mehls insgesamt als schlecht einzustufen. Die angewendeten Biokohlemengen waren sehr gering, was die geringen Effekte der Biokohlen auf die untersuchten Parameter erklären könnte.

### **3 Kapitel 2: Einfluss von Biokohlen auf bodenchemische Parameter sowie die Entwicklung von Nutzpflanzen im Gefäßversuch**

#### **3.1 Einleitung**

Die Wirkungen von unterschiedlichen Biokohlen wurden bereits in vielen Gefäßversuchen getestet. Allerdings sind, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, häufig Studien mit tropischen Böden durchgeführt worden. Untersuchungen auf Sandböden aus dem gemäßigten Klimabereich wurden bislang kaum durchgeführt. In den Meta-Analysen von Jeffery et al. (2011) und Biederman und Harpole (2013) sind ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst. Insgesamt können Biokohlen u.a. positive Effekte auf Pflanzenwachstum und bodenchemische Eigenschaften haben.

Der Effekt von mit Gärrest behandelten im Vergleich zu unbehandelten Biokohlen auf die Entwicklung von Kulturpflanzen, die Nährstoffgehalte in Sommerweizen und Mais sowie die Rohproteingehalte von Sommerweizen ist trotz bisheriger Untersuchungen unbekannt. Dabei stellt sich unter anderem die Frage, ob es durch die Behandlung mit Gärrest zu einer Aufladung der Biokohlen mit Nährstoffen kommt. Damit könnten die Biokohleeigenschaften und deren Wirkungen verbessert werden.

Außerdem sind die Nachwirkungen der Biokohlen weitgehend unbekannt. Es wäre denkbar, dass die Effekte der ausgebrachten Biokohlen auf die erste Kulturpflanzenart höher sind als auf die folgenden Kulturpflanzen oder umgekehrt. Schmidt et al. (2014) fanden nach der Anwendung der Biokohlen im Jahr 2011 in einem Feldversuch mit Weinreben, einen signifikant positiven Effekt der Biokohle auf den pH-Wert des Traubenmostes nach der Ernte im selben Jahr. Im Jahr 2013 konnte dieser nicht nachgewiesen werden. In einer anderen Studie von Jones et al. (2012) zeigte die Biokohleanwendung erst im dritten Jahr einen signifikanten Einfluss auf die Biomasse von Knäulgras (*Dactylis glomerata*) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. In der Meta-Analyse von Jeffery et al. (2011) wurde verdeutlicht, dass Biokohlen auf Kulturpflanzenarten differenziert wirken können und damit auch die Kulturpflanzenarten eine Rolle spielen. Die Nachwirkungen der Biokohlen konnten somit bislang nicht eindeutig bestimmt werden.

Das Ziel der vorliegenden Studie war deshalb, die Effekte der Anwendung der Biokohlen sowie deren Behandlung auf verschiedene Kulturpflanzen zu untersuchen.

Die Kulturpflanzen wurden in der Reihenfolge Sommerweizen- Sommergerste- Sommerraps- Mais gepflanzt. Dabei spielte der Vergleich zwischen Biokohlen und mit Gärrest fermentierten / gemischten Biokohlen eine wichtige Rolle. Am Ende der Fruchtfolge wurden Bodenproben entnommen, um die Wirkungen der unterschiedlichen Biokohlen auf bodenchemische Parameter zu quantifizieren. Nährstoffgehalte von Sommerweizen sowie Mais und Rohproteingehalte von Sommerweizen wurden ebenfalls berücksichtigt. Vermutet wurde, dass die unterschiedlichen Biokohlen die Biomasse der Kulturpflanzen differenziert beeinflussen. Die HTC-Biokohle reduziert die Erträge. Außerdem wurde angenommen, dass die Anwendung / Behandlung der Biokohlen mit Gärrest zu einer Verbesserung der Biokohleeigenschaften und damit zu Ertragssteigerungen führt.

### 3.2 Material und Methoden

#### Biokohleeigenschaften

Es wurden die beschriebenen Biokohlen sowie der Gärrest (Abschnitt 2.2) verwendet.

#### Bodeneigenschaften.

Lehmiger Sandboden wurde im April 2013 von dem Ackerschlag in Berge, Brandenburg, Deutschland (52° 37' 12" N, 12° 47' 42" E), auf dem auch der Feldversuch angelegt wurde, aus den oberen 10 cm mit Schaufeln entnommen. Der Boden wurde dann nach Berlin-Dahlem transportiert, luftgetrocknet und auf 4 mm gesiebt. Zwei Mischproben wurden entnommen, luftgetrocknet, auf 2 mm gesiebt und im Labor auf chemische Eigenschaften analysiert. Der Gesamtkohlenstoffgehalt ( $C_t$ ) sowie der Gesamtstickstoffgehalt ( $N_t$ ) wurden mittels Elementaranalyse ermittelt. Die Proben wurden mit einem Elementar Analysegerät (CNS VarioMAX, Elementar Analysis GmbH, Hanau, Deutschland) gemessen. Der organische Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) wurde mit dem VarioMAX TIC/TOC ebenfalls von der Firma Elementar Analysis GmbH bestimmt. Der pflanzenverfügbare (lösliche) Phosphor- ( $P_{DL}$ ) und Kaliumgehalt ( $K_{DL}$ ) wurden nach der Extraktion der Bodenproben mit einer Calcium-Lactat-Lösung (VDLUFA, 1997b) ermittelt. Tabelle 7 zeigt die chemischen Eigenschaften des für die Gefäßversuche verwendeten Bodens.

**Tabelle 7:** Chemische Eigenschaften des verwendeten Bodens (n=2) (TM = Trockenmasse).

	C <sub>t</sub> (% TM)	C <sub>org</sub> (% TM)	N <sub>t</sub> (% TM)	P <sub>DL</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	K <sub>DL</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	pH- Wert
Versuchsboden	0.79	0.73	0.07	0.10	0.12	6.2

Der C<sub>org</sub>-Gehalt lag bei 0.73 % TM, der daraus berechnete Humusgehalt war mit 1.25 % schwach humos. Der pflanzenverfügbare Phosphorgehalt (P<sub>DL</sub>) war nach VDLUFA (1997a) in der Gehaltsklasse D (hoher Gehalt) und der pflanzenverfügbare Kaliumgehalt (K<sub>DL</sub>) nach VDLUFA (1999) in der Gehaltsklasse C (optimal) einzustufen. Der pH-Wert lag mit 6.2 im schwach sauren Bereich. Die Wasserhaltekapazität des Bodens lag bei 27.12 %. Diese wurde ermittelt, um die Wasserversorgung der Gefäße auf 60 % WHK einstellen zu können.

### Gefäßversuche

Zu Versuchsbeginn wurde ein dreifaktorieller Gefäßversuch mit 4 Wiederholungen in Mitscherlich-Gefäßen angesetzt. Faktor A war dabei die Biokohle mit den Faktorstufen „ohne“, „Pyro“, „HTC“ und „Pyreg“. Faktor B (Gärrest) und Faktor C (Stickstoffdüngung) hatten jeweils die Faktorstufen „ohne“ und „mit“. Ein g Stickstoff Gefäß<sup>-1</sup> wurde zu den Behandlungen „mit“ Stickstoffdünger als Kalkammonsalpeter (KAS) in den Boden eingemischt. Pyro-Biokohle und HTC-Biokohle wurden zum Projektbeginn fermentiert (Abschnitt 2.2). Pyreg-Biokohle wurde mit dem für die Fermentierung verwendeten Gärrest im Gefäß gemischt. Da das Ziel des Versuches die Erhöhung des organischen Bodenkohlenstoffgehaltes von 0.73 % TM auf 1.0 % TM war und die Biokohlen unterschiedliche Kohlenstoffgehalte aufwiesen, wurden zum Boden (6 kg) 22.7 g Pyro-Biokohle, 96.8 g fermentierte Pyro-Biokohle, 38.0 g HTC-Biokohle, 83.7 g fermentierte HTC-Biokohle, 31.5 g Pyreg-Biokohle und 48.7 g Gärrest hinzugegeben.

In jedem Gefäß wurden 15 Sommerweizenkörner (*Triticum aestivum* L., cv. Chamsin, Qualitätsgruppe A, KWS Deutschland) ausgesät und später auf 10 Pflanzen vereinheitlicht. Die Gefäße wurden vollständig randomisiert in einem Drathhaus (zum Schutz vor Vögeln) unter natürlichen Bedingungen aufgestellt und auf 60 % Wasserhaltekapazität bewässert. Während der Vegetationszeit des Sommerweizens betrug die Durchschnittstemperatur 16.7 °C und die Niederschlagshöhe lag bei 338 mm.

Nach der Ernte des Sommerweizens wurde der Versuch geändert. Zum einen wurden die Gefäße im Gewächshaus (Minimumtemperatur: 15 °C; Durchschnittstemperatur: 18 °C; Maximumtemperatur: 21 °C, relative Luftfeuchtigkeit: 50-60 %, Tageslänge: 12 Stunden) für die folgenden Kulturen vollständig randomisiert aufgestellt und zum anderen wurden alle Gefäße mit Stickstoff gedüngt, um die Hauptwirkung des Stickstoffs zu begrenzen und mögliche Interaktionen zwischen Biokohle und Gärrest besser quantifizieren zu können. Der Boden bzw. das Boden-Biokohle Gemisch wurde manuell in jedem Gefäß neu durchgemischt. Außerdem erhielt jedes Gefäß ein g Stickstoff als KAS. Pro Gefäß wurden 15 Sommergerstenkörner (*Hordeum vulgare* L., cv. Grace, Ackermann Saatzucht Deutschland) gesät und später auf 10 Pflanzen vereinheitlicht. Nach der Ernte der Sommergerste wurden die Gefäße wieder durchgemischt, mit derselben Stickstoffmenge gedüngt und mit Sommerraps (*Brassica napus* L., cv. Osorno, Norddeutsche Pflanzenzucht Lembke KG) bestellt (5 Pflanzen Gefäß<sup>-1</sup>). Als letzte Kultur wurde Mais (*Zea mays* L., cv. Lukas, Limagrain GmbH Deutschland) (3 Pflanzen Gefäß<sup>-1</sup>) ausgesät. Die Gefäße wurden wie beschrieben wiederverwendet und gedüngt. Es standen somit vier unterschiedliche Kulturpflanzen in der Folge Sommerweizen-Sommergerste-Sommerraps-Mais in den Gefäßen.

#### Pflanzen- und Bodenprobenahme

Weizenpflanzen wurden im Entwicklungsstadium der Vollreife (BBCH- Stadium: 89, Meier (1997)) geerntet. Vor der Ernte wurden das BBCH-Stadium sowie die Wuchshöhe der Pflanzen wöchentlich bestimmt. Die Pflanzen wurden bei der Ernte an der Halmbasis abgeschnitten und die Weizenähren mit einem Einzelährendrescher ausgedroschen. Sowohl das Stroh, als auch das Korn wurden bei 60 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen, um Spross- und Korntrockenmasse zu bestimmen. Die Kornzahl Ähre<sup>-1</sup> wurde berechnet, indem die Körner Gefäß<sup>-1</sup> durch die Anzahl Ähren Gefäß<sup>-1</sup> geteilt wurden. Anschließend wurden Stroh und Korn gemahlen, um die Nährstoffe N (Vario Max (Elementar)), P, K, Mg und Ca (ICP-OES (Thermo)) im Stroh sowie N (Vario Max (Elementar)) im Korn für die Berechnung des Rohproteingehaltes ( $N \times 5,7$ ) zu bestimmen.

Sommergerste (BBCH: 35 (Schossen), Meier (1997)) und Sommerraps (BBCH: 65 (Blüte); Meier (1997)) wurden bei der Ernte ebenfalls an der Halm- bzw. Stängelbasis



abgeschnitten, bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen, um die Trockenmasse zu bestimmen.

Der Mais wurde auch zum Zeitpunkt des Schossens (BBCH:34; Meier (1997)) geerntet. Nach der Bestimmung der Trockenmasse wurden die Maispflanzen gemahlen, um die Nährstoffe N, P, K, Mg und Ca wie bereits beschrieben im Labor zu analysieren. Des Weiteren wurde aus jedem Gefäß eine Bodenmischprobe mit einem Bohrstock (5 Einstiche) für die chemische Analyse von  $C_t$ ,  $C_{org}$ ,  $N_t$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$  und zur Bestimmung der pH-Werte entnommen.

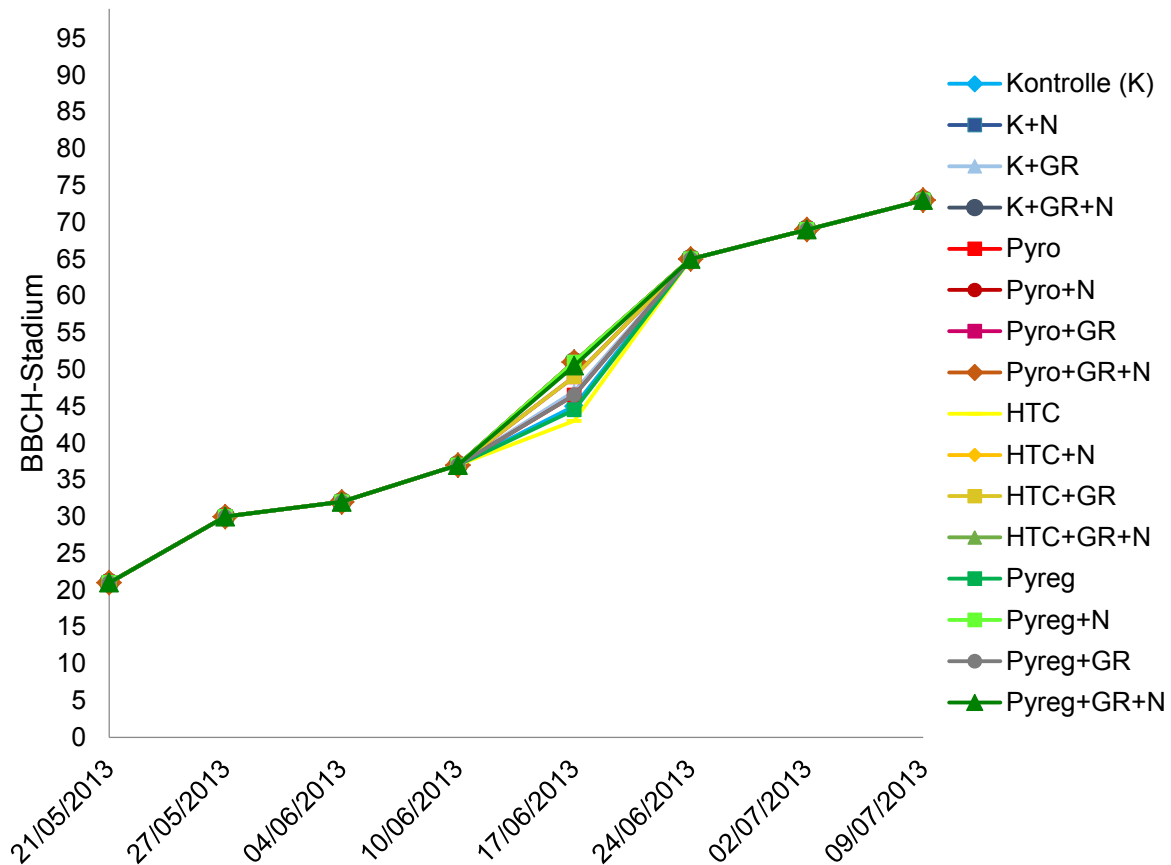
### Statistische Analyse

Alle Parameter wurden mit der einfaktoriellen ANOVA gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ) zur Analyse der signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen getestet (SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows). Zur Bestimmung der Faktor- und Wechselwirkungen wurde bei Sommerweizen die univariate (dreifaktorielle) ANOVA mit den Faktoren Biokohle, Gärrest sowie Stickstoffdüngung und bei Sommergerste, Sommerraps und Mais ebenfalls die univariate, aber zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Biokohle und Gärrest angewendet. Daten wurden als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung (SD) berechnet.

### 3.3 Ergebnisse

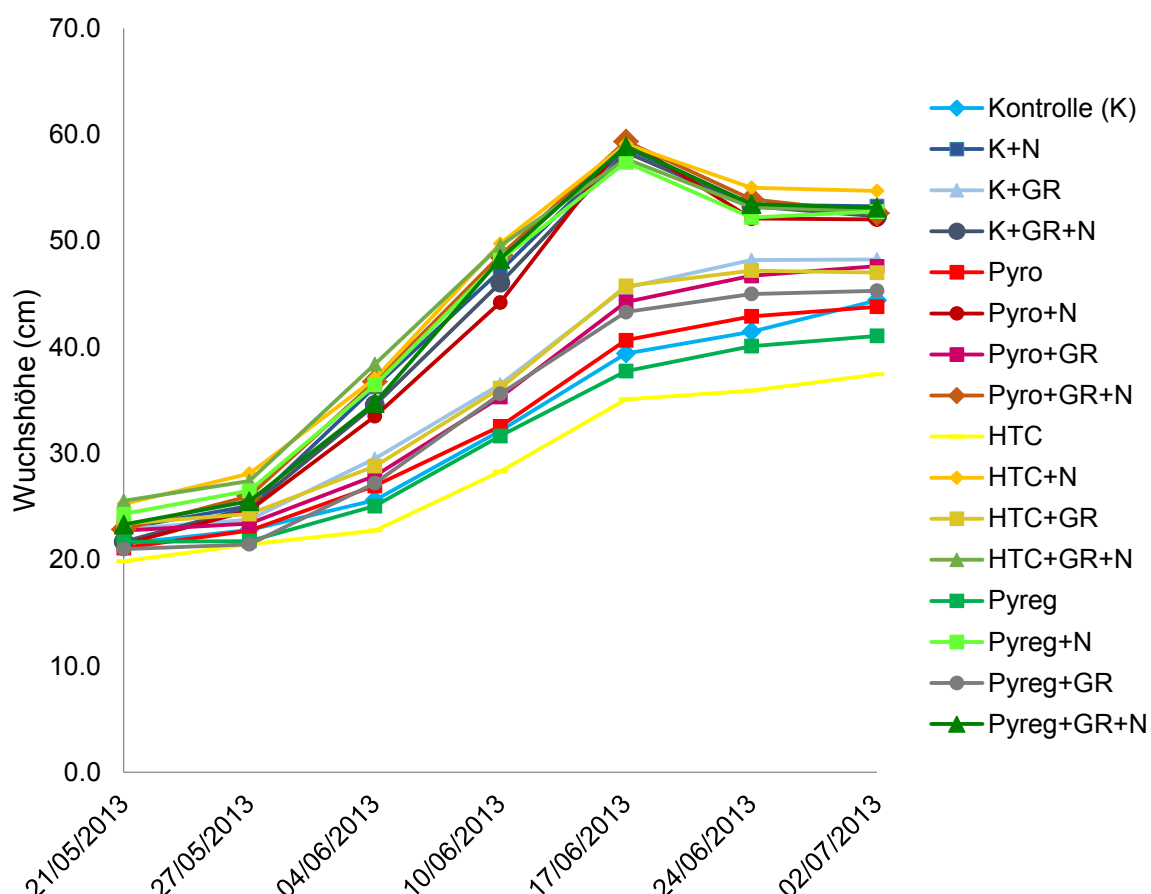
#### BBCH-Stadium und Wuchshöhe des Sommerweizens

Die BBCH-Stadien (Meier, 1997) wurden zwischen dem 21.05.2013 und dem 09.07.2013 wöchentlich bestimmt (Abb. 8). Mit Ausnahme des 17.06.2013 gab es keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Behandlungen. Die Unterschiede im BBCH-Stadium am 17.06.2013 waren in der folgenden Woche (24.06.2013) nicht mehr vorhanden.



**Abbildung 8:** Entwicklung von Sommerweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung nach BBCH-Stadien (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest).

Zusätzlich zum BBCH-Stadium wurde das Wachstum durch Messung der Wuchshöhe quantifiziert. Diese wurde in der Zeit vom 21.05.2013 bis zum 02.07.2013 wöchentlich mit einem Zollstock an je fünf Sommerweizenpflanzen pro Gefäß gemessen. Ab dem 02.07.2013 fand kein Wachstum mehr statt (Abb. 9).



**Abbildung 9:** Entwicklung der Wuchshöhe (cm) von Sommerweizen unter dem Einfluss verschiedener Biokohlen und Stickstoffdüngung (n=4) (N = Stickstoffdüngung; GR = Gärrest).

Aus Abbildung 9 lassen sich Unterschiede zwischen den Behandlungen in der Wuchshöhe ableiten. Die statistischen Unterschiede sind in Tabelle 8 dargestellt.

Während sich am ersten Termin (21.05.2013) die Wuchshöhen von Sommerweizen kaum unterschieden, differenzierten sie sich in den folgenden Wochen immer deutlicher. Zum 1. Termin war die Wuchshöhe von der Behandlung mit HTC-Kohle signifikant niedriger im Vergleich zu den Behandlungen HTC+N und HTC+GR+N. Die Hauptwirkung hatte zu diesem Zeitpunkt der Stickstoff. Es gab eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Biokohle und dem Stickstoff (Tab. 8).

Beim dritten (04.06.2013), vierten (10.06.2013) sowie sechsten (24.06.2013) Termin waren die Hauptwirkungen Gärrest und Stickstoff sowie die Wechselwirkungen Biokohle x Stickstoff, Gärrest x Stickstoff und Biokohle x Gärrest x Stickstoff signifikant (Tab. 8).

Tendenziell wirkte die Anwendung der HTC-Biokohle negativ.

**Tabelle 8:** Statistische Unterschiede in der Wuchshöhe von Sommerweizen zwischen den Behandlungen, Haupt- und Wechselwirkungen zu den jeweiligen Zeitpunkten im Jahr 2013. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (n.s. = nicht signifikant, s. = signifikant).

Behandlung	21.05.	27.05.	04.06.	10.06.	17.06.	24.06.	02.07.
Kontrolle (K)	ab	bcd	de	def	bcd	efg	de
K+N	ab	abcd	ab	ab	a	ab	ab
K+GR	ab	abcd	cd	c	b	bcd	bcd
K+GR+N	ab	abcd	ab	ab	a	ab	abc
Pyro	ab	cd	de	cdef	bcd	def	de
Pyro+N	ab	abcd	bc	b	a	abc	abc
Pyro+GR	ab	bcd	e	cde	b	cde	bcd
Pyro+GR+N	ab	abcd	ab	a	a	a	abc
HTC	b	d	e	f	d	g	f
HTC+N	a	a	ab	a	a	a	a
HTC+GR	ab	abcd	e	cd	b	cd	cde
HTC+GR+N	a	ab	a	a	a	ab	abc
Pyreg	ab	d	de	ef	cd	fg	ef
Pyreg+N	ab	abc	ab	ab	a	abc	abc
Pyreg+GR	ab	d	de	cde	bc	def	de
Pyreg+GR+N	ab	abcd	ab	ab	a	ab	ab
<b>Haupt- und Wechselwirkungen</b>							
Biokohle (B)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Gärrest (GR)	n.s.	n.s.	s.	s.	s.	s.	s.
Stickstoff (N)	s.	s.	s.	s.	s.	s.	s.
B x GR	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
B x N	s.	s.	s.	s.	n.s.	s.	s.
GR x N	n.s.	n.s.	s.	s.	s.	s.	s.
B x GR x N	n.s.	n.s.	s.	s.	n.s.	s.	n.s.

Zum letzten Termin (02.07.2013) hatten die Sommerweizenpflanzen in der Behandlung mit HTC-Biokohle die geringste und in der Behandlung HTC+N die höchste gemessene Wuchshöhe. Hervorzuheben ist in Tabelle 8, dass die Biokohle zu keinem Termin eine signifikante Hauptwirkung auf die Wuchshöhe hatte.

#### Ertrag und Ertragsstruktur von Sommerweizen

Der Sommerweizen wurde am 12.08.2013 geerntet. Der Kornertrag variierte dabei zwischen 4.54 und 6.69 g Gefäß<sup>-1</sup> in den nicht gedüngten, 7.88-8.01 g Gefäß<sup>-1</sup> in den mit Gärrest fermentierten / gemischten und 23.52-27.40 g Gefäß<sup>-1</sup> in den gedüngten und mit / ohne Gärrest behandelten Varianten (Tab. 9). Die Stroherträge lagen auf einem ähnlichen Niveau. Sowohl der Kornertrag als auch der Strohertrag zeigten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen. Die mit Stickstoff (+N) gedüngten Behandlungen hatten höhere Korn- und Stroherträge unabhängig von den Biokohlen und deren Produktionsprozessen. Die Behandlung HTC hatte einen geringeren Strohertrag als die Behandlung Kontrolle (Boden) + Gärrest. Auch der

Kornertrag von Sommerweizen in der Behandlung HTC war tendenziell geringer als die Erträge in den Varianten Kontrolle, Pyro und Pyreg (Tab. 9).

**Tabelle 9:** Ertrag, Ernteindex und Parameter der Ertragsstruktur von Sommerweizen (n=4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (GR = Gärrest; N = Stickstoff).

Behandlung	Korn- ertrag (g Gefäß <sup>-1</sup> )	Stroh- ertrag (g Gefäß <sup>-1</sup> )	Ernteindex	Kornzahl Ähre <sup>-1</sup>	Tausendkorn- gewicht (g)
Kontrolle (K)	6.69 b	6.94 bc	0.49 a	20.35 cd	32.15 a
K+N	24.80 a	22.19 a	0.53 a	38.66 a	32.68 a
K+GR	8.01 b	8.48 b	0.49 a	21.63 cd	33.22 a
K+GR+N	23.69 a	21.52 a	0.52 a	32.79 abc	35.01 a
Pyro	6.49 b	6.92 bc	0.48 a	20.43 cd	31.90 a
Pyro+N	25.34 a	21.19 a	0.54 a	39.97 a	34.48 a
Pyro+GR	7.95 b	8.07 bc	0.50 a	22.98 cd	33.98 a
Pyro+GR+N	27.40 a	23.54 a	0.54 a	40.64 a	34.73 a
HTC	4.54 b	4.71 c	0.49 a	14.35 d	31.70 a
HTC+N	27.51 a	23.21 a	0.54 a	42.55 a	32.12 a
HTC+GR	7.89 b	7.40 bc	0.52 a	23.13 cd	34.09 a
HTC+GR+N	25.36 a	23.98 a	0.51 a	37.24 a	33.83 a
Pyreg	6.04 b	6.03 bc	0.50 a	17.99 d	32.81 a
Pyreg+N	23.52 a	21.80 a	0.52 a	39.23 a	32.80 a
Pyreg+GR	7.88 b	7.50 bc	0.51 a	23.28 bcd	33.92 a
Pyreg+GR+N	24.27 a	23.14 a	0.51 a	36.86 ab	33.99 a

Die Kornzahl Ähre<sup>-1</sup> wurde durch die Hauptwirkung Stickstoff beeinflusst. Die höchste Kornzahl Ähre<sup>-1</sup> war in der Behandlung HTC + N nachweisbar, die geringste in der Behandlung mit HTC-Biokohle.

Der Ernteindex sowie das Tausendkorngewicht wiesen keine Unterschiede zwischen den Behandlungen auf (Tab. 9).

#### Nährstoffgehalte und Rohproteingehalt von Sommerweizen

Die Stickstoffgehalte im Stroh variierten zwischen 0.33 und 0.86 % TM und die Calciumgehalte zwischen 2.37 und 5.26 g kg<sup>-1</sup>. Die Stickstoff- und Calciumgehalte wurden durch den Stickstoffdünger beeinflusst (Tab. 10a). Der Rohproteingehalt, ein wichtiges Maß für die Qualität von Weizen, lag zwischen 9.63 und 18.55 % TM und wurde ebenfalls durch die Anwendung von Stickstoff beeinflusst (Tab. 10b).

**Tabelle 10:** Nährstoffgehalte im Stroh (a) und Rohproteingehalte des Korns (b) von Sommerweizen (n = 4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (GR = Gärrest; N = Stickstoffdüngung).

Behandlung	a) N Gehalt (% TM)	P Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	K Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	Mg Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	Ca Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	b) Roh- protein- gehalt (%TM)
Kontrolle (K)	0.36 b	0.74 ab	7.96 ab	0.69 c	2.59 b	9.86 b
K+N	0.82 a	0.51 b	5.35 cd	1.05 a	5.20 a	18.13 a
K+GR	0.41 b	0.80 ab	7.81 ab	0.72 c	2.98 b	9.81 b
K+GR+N	0.82 a	0.56 b	7.35 ab	1.01 ab	5.26 a	18.55 a
Pyro	0.33 b	0.70 ab	8.47 ab	0.67 c	2.37 b	10.05 b
Pyro+N	0.73 a	0.68 ab	7.47 ab	0.94 abc	4.98 a	17.59 a
Pyro+GR	0.41 b	0.83 ab	8.85 a	0.68 c	2.50 b	9.87 b
Pyro+GR+N	0.73 a	0.54 b	8.30 ab	0.87 abcd	4.52 a	17.08 a
HTC	0.36 b	1.09 a	8.06 ab	0.85 abcd	2.43 b	11.74 b
HTC+N	0.69 a	0.50 b	4.91 d	1.02 ab	4.76 a	15.79 a
HTC+GR	0.36 b	0.78 ab	7.31 abc	0.72 c	2.79 b	10.26 b
HTC+GR+N	0.81 a	0.62 b	6.53 bcd	1.03 ab	4.90 a	17.26 a
Pyreg	0.33 b	1.07 a	8.18 ab	0.82 bcd	2.71 b	10.29 b
Pyreg+N	0.78 a	0.52 b	6.46 bcd	1.06 a	4.68 a	17.90 a
Pyreg+GR	0.35 b	0.84 ab	7.74 ab	0.74 cd	2.39 b	9.63 b
Pyreg+GR+N	0.86 a	0.61 b	7.98 ab	1.00 ab	4.61 a	17.97 a

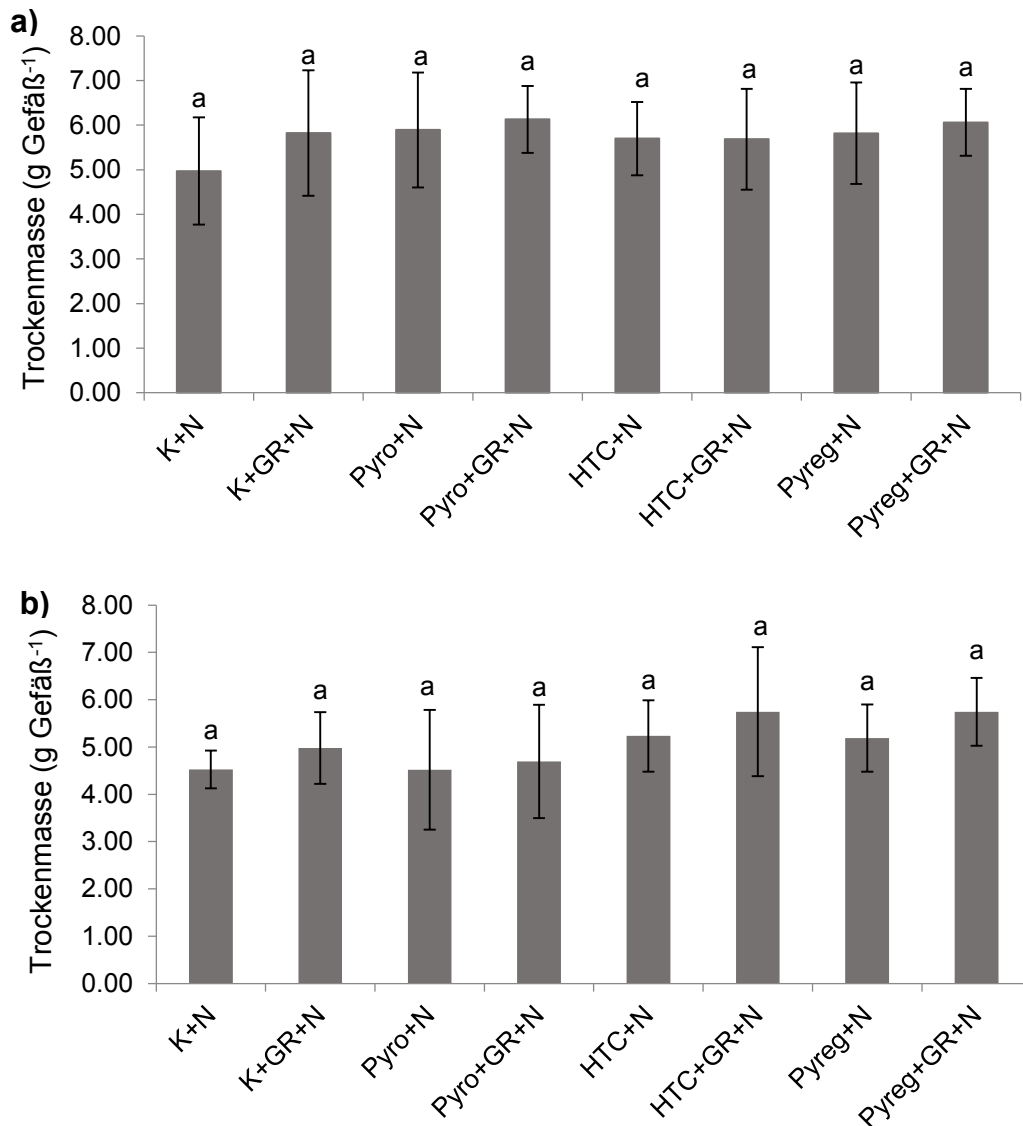
Die Behandlungen mit HTC-Biokohle und Pyreg-Biokohle führten zu den höchsten Phosphorgehalten im Stroh. Die niedrigsten Phosphorgehalte hatte das Stroh von Sommerweizen in den Behandlungen mit Stickstoff, mit der Ausnahme der Behandlung Pyro+N. Der höchste Kaliumgehalt wurde im Stroh in der Variante Pyro+Gärrest und der höchste Magnesiumgehalt in der Behandlung Pyreg+N gefunden (Tab. 10a).

Der Kaliumgehalt wurde durch die Hauptwirkungen Biokohle, Gärrest und Stickstoffdünger beeinflusst. Signifikante Hauptwirkungen auf den Magnesiumgehalt hatten die Biokohle und der Stickstoffdünger.

#### Trockenmasseerträge von Sommergerste und Sommerraps

Nach der Ernte von Sommerweizen wurden alle Gefäße aufgrund der Hauptwirkung des Stickstoffs gedüngt und im Gewächshaus aufgestellt. Sommergerste wurde als Folgekultur ausgesät.

Die Trockenmassen von Sommergerste lagen im Mittel bei etwa 6 g Gefäß<sup>-1</sup> und zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen (Abb. 10a). Es gab keine signifikanten Haupt- und Wechselwirkungen.



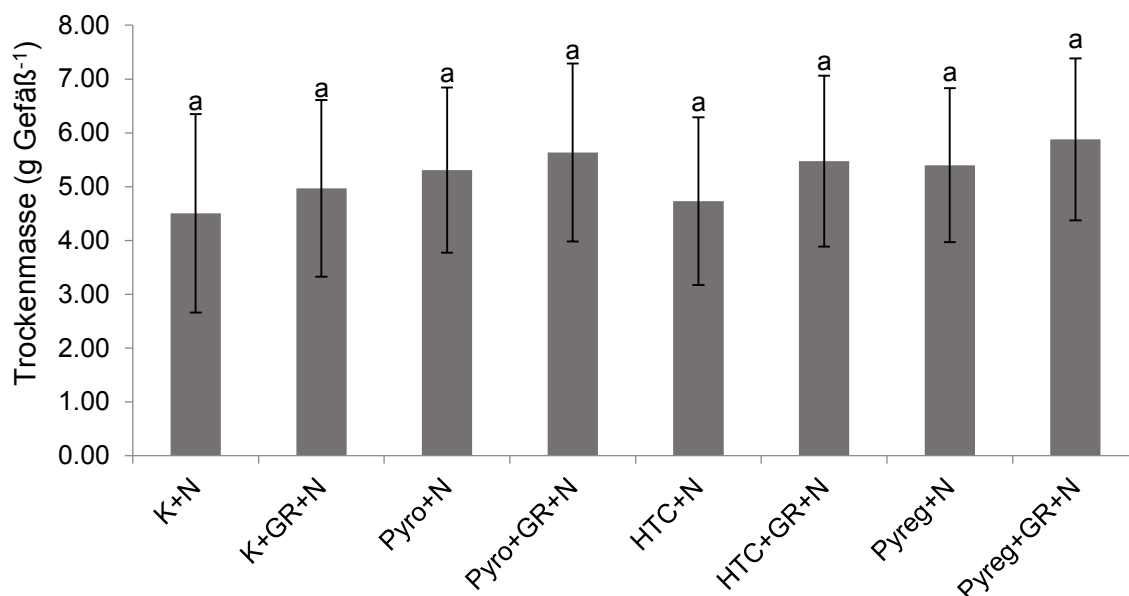
**Abbildung 10:** Trockenmassen (g Gefäß<sup>-1</sup>) von Sommergerste (a) und Sommerraps (b) (n=8). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff).

Die Trockenmasseerträge von Sommerraps zeigten ebenfalls keine Unterschiede zwischen den Behandlungen (Abb. 10b). Allerdings hatte die Biokohle eine signifikante Hauptwirkung auf die Trockenmassen von Sommerraps. Die höchsten Trockenmassen waren in den Behandlungen HTC+GR+N und Pyreg+GR+N nachweisbar.

#### Trockenmasseertrag und Nährstoffgehalte von Mais

Nach der Ernte des Maises wurden die Trockenmassen bestimmt. Diese variierten stärker und lagen bei durchschnittlich 5 g Gefäß<sup>-1</sup>. Die Trockenmassen wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen auf (Abb. 11). Die

Behandlungen Kontrolle (K) +Stickstoff (N) und HTC+N führten zu den geringsten Trockenmassen.



**Abbildung 11:** Trockenmassen (g Gefäß<sup>-1</sup>) von Mais. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff).

Beim Mais hatte ebenfalls die Biokohle eine signifikante Hauptwirkung auf die Trockenmassen.

Zur Bestimmung der Nährstoffgehalte des Maises wurden die Pflanzen gemahlen und analysiert. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 11 dargestellt.

**Tabelle 11:** Nährstoffgehalte des Maises (n=8). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff).

Behandlung	N Gehalt (% TM)	P Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	K Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	Mg Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )	Ca Gehalt (g kg <sup>-1</sup> )
K+N	2.90 a	1.72 a	12.39 abc	7.63 ab	8.47 a
K+GR+N	2.92 a	1.78 a	12.19 bc	7.38 ab	8.00 a
Pyro+N	2.99 a	1.89 a	14.03 ab	6.70 b	7.85 a
Pyro+GR+N	2.86 a	1.78 a	15.72 a	6.52 b	7.33 a
HTC+N	3.00 a	2.12 a	10.46 c	8.38 a	9.10 a
HTC+GR+N	2.98 a	1.98 a	11.17 bc	7.36 ab	7.60 a
Pyreg+N	3.04 a	2.34 a	10.11 c	7.67 ab	8.07 a
Pyreg+GR+N	3.04 a	2.18 a	12.51 abc	7.34 ab	7.17 a
<b>Haupt- und Wechselwirkungen</b>					
Biokohle (B)	n.s.	<b>s.</b>	<b>s.</b>	<b>s.</b>	n.s.
Gärrest (GR)	n.s.	n.s.	<b>s.</b>	n.s.	n.s.
B x GR	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.



Während die Stickstoff- und Calciumgehalte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen aufwiesen, zeigte der Phosphorgehalt zwar ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen, wurde aber signifikant durch die Anwendung von Biokohlen beeinflusst. Der Magnesiumgehalt war in der Variante HTC+N mit  $8.38 \text{ g kg}^{-1}$  am höchsten und in den Varianten Pyro+N sowie Pyro+GR+N mit  $6.70$  und  $6.52 \text{ g kg}^{-1}$  am geringsten. Dieser wurde ebenfalls durch die Biokohleanwendung beeinflusst. Die Anwendung von Biokohle sowie die Verwendung von Gärrest hatten Auswirkungen auf den Kaliumgehalt der Maispflanzen. Wechselwirkungen zwischen Biokohle und Gärrest wurden nicht gefunden (Tab. 11).

#### Änderungen der bodenchemischen Parameter

Nach der Maisernte im März 2014 wurden Probenproben entnommen, luftgetrocknet und analysiert (Tab. 12).

**Tabelle 12:** Chemische Parameter des Bodens (n=8). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) (K = Kontrolle; GR = Gärrest; N = Stickstoff).

Behandlung	$C_t$ (%)	$C_{org}$ (%)	$N_t$ (%)	$P_{DL}$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )	$K_{DL}$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )	pH-Wert
K+N	0.72 c	0.63 d	0.08 a	0.083 b	0.013 a	6.17 bc
K+GR+N	0.82 bc	0.75 c	0.09 a	0.084 ab	0.018 a	6.24 abc
Pyro+N	0.91 ab	0.78 abc	0.08 a	0.090 ab	0.019 a	6.33 ab
Pyro+GR+N	0.91 ab	0.83 ab	0.09 a	0.093 a	0.022 a	6.28 ab
HTC+N	0.87 ab	0.79 abc	0.09 a	0.084 b	0.017 a	6.05 c
HTC+GR+N	0.91 ab	0.77 bc	0.09 a	0.082 b	0.016 a	6.28 ab
Pyreg+N	0.94 a	0.85 a	0.09 a	0.087 ab	0.017 a	6.23 abc
Pyreg+GR+N	0.91 ab	0.83 ab	0.09 a	0.083 b	0.016 a	6.42 a
<b>Haupt- und Wechselwirkungen</b>						
Biokohle (B)	<b>s.</b>	<b>s.</b>	n.s.	<b>s.</b>	n.s.	<b>s.</b>
Gärrest (GR)	n.s.	<b>s.</b>	n.s.	n.s.	n.s.	<b>s.</b>
B x GR	<b>s.</b>	<b>s.</b>	n.s.	n.s.	n.s.	<b>s.</b>

Der Stickstoffgehalt sowie das pflanzenverfügbare Kalium ( $K_{DL}$ ) wiesen keine Unterschiede zwischen den Behandlungen auf. Die Anwendung von Biokohlen hatte Effekte auf den pflanzenverfügbaren Phosphor ( $P_{DL}$ ) des Bodens.  $C_t$  und  $C_{org}$  waren in der Variante Kontrolle+Stickstoff am geringsten. Sowohl der organische Kohlenstoffgehalt als auch der pH-Wert wurden signifikant durch die Anwendung von Biokohle und Gärrest sowie deren Interaktion beeinflusst (Tab. 12).

### 3.4 Diskussion

#### Effekt der Biokohlen und deren Behandlung auf Kulturpflanzen

Die dargestellten Ergebnisse deuten auf die differenzierten Wirkungen der Biokohlen auf Wachstum und Entwicklung sowie Ertrag von Nutzpflanzen hin. Da die Ergebnisse des vorliegenden Gefäßversuchs ebenfalls keine Unterschiede im BBCH-Stadium aufwiesen (mit der Ausnahme des 17.06.2013), hatten die geprüften Biokohlen keine Auswirkungen auf den Entwicklungsverlauf.

Im Vergleich zur phänologischen Entwicklung gab es deutlich erkennbare Unterschiede in der Wuchshöhe von Sommerweizen. Bereits zum ersten Termin (21.05.2013) hatten die Pflanzen in dem mit HTC-Biokohle gemischten Boden eine geringere Wuchshöhe als die Pflanzen in den Behandlungen HTC+N und HTC+GR+N. Zu den folgenden Terminen hatten die Pflanzen in der Behandlung mit HTC-Biokohle immer die geringste gemessene Wuchshöhe. Ähnlich zu den dargestellten Ergebnissen wurde eine frühe Wachstumsreduktion von Zuckerrüben in Feld- und Gefäßversuchen beobachtet, wenn HTC-Biokohle mit einer geringen Stickstoffmenge kombiniert wurde (Gajić und Koch, 2012). Die Kombination aus Biokohle+Stickstoff führte zu einer größeren Wuchshöhe des Sommerweizens. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Ergebnissen von Schulz und Glaser (2012), die eine signifikant höhere Pflanzenhöhe von Hafer (*Avena sativa* L.) in der Behandlung Biokohle+Düngung im Vergleich zur Kontrolle sowie der reinen Biokohlebehandlung oder der reinen Düngerbehandlung fanden.

Der Kornertrag des Sommerweizens wurde durch den Stickstoffdünger positiv beeinflusst und war in der Behandlung mit HTC-Biokohle am geringsten. Der Strohertrag war ebenfalls in der Behandlung mit HTC-Biokohle am geringsten. Andere Studien zeigten ebenfalls negative Einflüsse der Verwendung von HTC-Biokohlen auf die Biomasseproduktion von Porree und Sommergerste (Bargmann et al., 2014b, c). Es wird vermutet, dass durch die ausschließliche Anwendung von HTC-Biokohle ein Stickstoffmangel verursacht wird, der vom C:N-Verhältnis abhängig ist. Das könnte auch die hier gezeigten Ergebnisse erklären. Das C:N-Verhältnis der HTC-Biokohle war mit 32 im Vergleich zu Pyro-Biokohle und Pyreg-Biokohle relativ eng, allerdings im Vergleich zur fermentierten HTC-Biokohle doppelt so hoch.

Aus den Ergebnissen der Ertragsstruktur von Sommerweizen wird ersichtlich, dass die Kornzahl Ähre<sup>-1</sup> durch die Stickstoffdüngung signifikant beeinflusst wurde. Das deckt sich mit anderen Studien (z.B. Mitchell et al. (1993)). Die Kornzahl Ähre<sup>-1</sup> war in der Behandlung mit reiner HTC-Biokohle wiederum am geringsten. Dieses lässt sich möglicherweise ebenfalls durch den verursachten Stickstoffmangel erklären.

Aufgrund der Ergebnisse vom Sommerweizen wurde das Versuchsdesign geändert. Da durch die Anwendung von HTC-Biokohle scheinbar ein Stickstoffmangel induziert wurde und der Verzicht auf Stickstoffdüngung nicht praxisüblich ist, wurden alle Gefäße vor der Aussaat von Sommergerste mit Stickstoff gedüngt, um die Nachwirkungen der Biokohlen zu testen. Außerdem wurden die Gefäße witterungsbedingt im Gewächshaus aufgestellt. Die Sommergerste und der folgende Sommerraps wiesen keine Unterschiede zwischen den Behandlungen auf. Trotzdem hatte die Biokohle beim Sommerraps eine signifikante Hauptwirkung, was auf eine positive Nachwirkung der Biokohlen hindeutet.

Der Mais als abschließende Kultur der Fruchtfolge Sommerweizen- Sommergerste- Sommerraps- Mais wurde ebenfalls signifikant durch die Hauptwirkung Biokohle beeinflusst. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Nachwirkung der Biokohlen vorhanden ist. Das bedeutet, dass Biokohlen die Erträge von Kulturpflanzen langfristig beeinflussen können. Diese Ergebnisse sind weitestgehend vergleichbar mit der Studie von Jones et al. (2012), die erst im dritten Jahr einen signifikanten Einfluss der Biokohleanwendung auf die Biomasse von Knäulgras (*Dactylis glomerata*) nachweisen konnten. Möglich wäre auch die Annahme, dass Raps als dikotyle Pflanze und Mais als C4-Pflanze anders beeinflusst werden als Monokotyle.

#### Effekt der Biokohlen auf Nährstoffe und Qualität von Kulturpflanzen

Die Nährstoffgehalte und die Rohproteingehalte des Sommerweizens sowie die Nährstoffgehalte von Mais wurden untersucht. Dabei konnten unter anderem Effekte der Biokohlen nachgewiesen werden. Während die Stickstoff-, Calcium- und Rohproteingehalte des Sommerweizens vom Stickstoffdünger beeinflusst wurden, war der Phosphorgehalt in den Behandlungen mit Pyreg-Biokohle und HTC-Biokohle am höchsten. Beim Mais waren die Phosphorgehalte in den Varianten HTC+N und Pyreg+N am höchsten mit einer signifikanten Hauptwirkung der Biokohle. Es ist anzunehmen, dass die HTC-Biokohle sowie die Pyreg-Biokohle höhere Gehalte an

löslichem Phosphor enthielten, die pflanzenverfügbar waren. Weitere Studien aus der Literatur fanden ebenso einen Einfluss der Biokohleapplikation auf die Phosphorgehalte von Rettich (Chan et al., 2007) und Mais (Uzoma et al., 2011).

Der Kaliumgehalt wurde beim Sommerweizen durch die drei Hauptwirkungen beeinflusst. Beim Mais, bei dem es nur die Hauptwirkungen Biokohle und Gärrest gab, waren beide signifikant. Behandlungen mit Pyro-Biokohle zeigten die höchsten Kaliumgehalte bei beiden Kulturen. Der positive Effekt der Pyro-Biokohle auf den Kaliumgehalt kann durch den hohen Kaliumgehalt der reinen Pyro-Biokohle erklärt werden, der bei  $31.12 \text{ g kg}^{-1}$  lag.

#### Effekt der Biokohlen auf chemische Bodeneigenschaften

Nach der Ernte der Maispflanzen wurden Bodenproben zur chemischen Untersuchung aus den Gefäßen entnommen. Der Stickstoffgehalt wies keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen auf, da alle Gefäße gleichmäßig mit Stickstoff gedüngt wurden. Auch der Kaliumgehalt wurde nicht beeinflusst und war sehr niedrig, da während des Gefäßversuches kein Kalium gedüngt wurde. Andere Studien deuten auf eine positive Änderung des pflanzenverfügbaren Kaliums nach der Anwendung von Biokohlen hin (Chan et al., 2007; Schulz und Glaser, 2012).

Der angestrebte organische Kohlenstoffgehalt von 1.0 % wurde durch die Anwendung der Biokohlen nicht erreicht. Zwar hatten die Varianten mit Biokohle signifikant höhere organische Kohlenstoffgehalte im Vergleich zu der Behandlung Kontrolle+Stickstoff, aber die höchsten Werte lagen um 0.80 % in der Trockenmasse. In der Literatur sind Untersuchungen bekannt, die auf eine Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehaltes durch die Anwendung von Biokohlen hinweisen (Chan et al., 2007; Schulz und Glaser, 2012). Im Vergleich zum Ausgangszustand des Bodens, bei dem der organische Kohlenstoffgehalt bei 0.73 % lag, war der Gehalt im Boden (Kontrolle)+N mit 0.63 % geringer. Das könnte bedeuten, dass der organische Kohlenstoffgehalt zur Aussaat des Sommerweizens auf 1.0 % erhöht wurde, dann aber im zeitlichen Verlauf wieder abnahm. Fraglich ist, ob eine dauerhafte Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehaltes durch die einmalige Anwendung von Biokohlen überhaupt möglich ist oder ob in regelmäßigen Abständen Biokohlen appliziert werden müssen.

## Biokohle versus fermentierte Biokohle

In dem Gefäßversuch spielte als weitere Hypothese die Ausbringung von Biokohle im Vergleich zu fermentierter (HTC, Pyro) oder mit Gärrest gemischter Biokohle (Pyreg) eine wesentliche Rolle, da dieses bislang nicht untersucht wurde. In einigen Studien wurden die Wirkungen von Biokohlen in Kombination mit Kompost (Liu et al., 2012; Schulz und Glaser, 2012) bereits untersucht, aber Auswirkungen der Anwendung von mit Gärrest fermentierten Biokohlen sind bislang noch nicht hinreichend bekannt.

Nach eingehender Betrachtung der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die Fermentierung von HTC-Biokohle durchaus sichtbar positive Wirkungen im Gefäßversuch haben kann. Die beschriebenen negativen Wirkungen der HTC-Biokohle wurden durch die Fermentierung aufgehoben. Dabei haben vor allem die Erhöhung des pH-Wertes von 5.25 in der reinen Kohle und 7.03 in der fermentierten Kohle sowie das geringere C:N Verhältnis (16.93) der fermentierten HTC-Biokohle eine wichtige Rolle gespielt.

## 3.5 Schlussfolgerungen

Der Gefäßversuch mit der Fruchtfolge Sommerweizen- Sommergerste- Sommerraps- Mais zeigte differenzierte Wirkungen der Biokohleanwendung zum Boden. Nach Betrachtung der Ergebnisse des Sommerweizens mit der Hauptwirkung des Stickstoffs auf die untersuchten Parameter, wurde zur Quantifizierung der Nachwirkungen der Faktor Stickstoff durch gleichmäßige Düngung aller Gefäße ausgeschlossen, da die Düngung in der Praxis ohnehin nicht ausgesetzt wird. Es zeigte sich, dass Biokohlen die Erträge von Kulturpflanzen langfristig beeinflussen können. Nährstoffe in den Biokohlen können pflanzenverfügbar sein und damit die Nährstoffgehalte der Pflanzen signifikant erhöhen. Die Eigenschaften der HTC-Biokohle konnten durch die Fermentierung mit Gärrest deutlich verbessert werden. Allerdings sind weitere Versuche mit unterschiedlichen Biokohlen sowie deren Fermentierung notwendig, da nicht alle Biokohlen positive Effekte haben und die Biokohlen und deren Eigenschaften vor der Ausbringung im Feld genau untersucht werden sollten.

## 4 Kapitel 3: Wirkungen von Biokohlen auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen

### 4.1 Einleitung

Obwohl der Einsatz unterschiedlicher Biokohlen in der Landwirtschaft Vorteile haben kann, ist in der Literatur wenig über die Effekte der Biokohlen auf das Wurzelwachstum, die Wurzelmorphologie und Wurzel-Biokohle-Interaktionen bekannt. Dieses Wissen ist dennoch notwendig, um die Biokohleanwendung in landwirtschaftlichen Produktionssystemen zu optimieren.

Makoto et al. (2010) zeigten einen signifikanten Anstieg der Wurzelbiomasse (47 %) und Anzahl an Wurzelspitzen (64 %) der Lärche (*Larix gmelinii*) in einer Kohleschicht aus Lärchenzweigen, Birkenzweigen und Zwergbambus, entstanden nach einem Waldbrand in einem Cambisol. Außerdem wurde ein Anstieg der Wurzellänge von Reis mit der Anwendung von Biokohle nachgewiesen (Noguera et al., 2010). Der Einsatz unterschiedlicher Konzentrationen von Hydrokohle (HTC-Biokohle) aus Zuckerrübenschnitzeln zum Boden bewirkte ein geringeres Wurzelgewicht vom Gewöhnlichen Löwenzahn (*Taraxacum* sect. *Ruderalia*) (Rillig et al., 2010). Neben diesen Beobachtungen ist trotzdem unklar, in welcher Weise Wurzeln durch unterschiedliche Biokohlen in verschiedenen Entwicklungsstadien beeinflusst werden.

Generell beeinflusst die Biokohle Pflanzenwurzeln durch zwei unterschiedliche Mechanismen. Zum einen können die Wurzeln in die Biokohlepartikel einwachsen (Lehmann et al., 2003). Dieses wurde unter natürlichen Bedingungen beobachtet. Zum anderen kann das Wurzelwachstum zusätzlich zu dem direkten Kontakt zwischen Wurzeln und Biokohlepartikeln durch Nährstoffe, die aus der Kohle freigesetzt werden, beeinflusst werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gibt es keine praktikable Methode, um den Einfluss der Biokohlen auf die Wurzelmorphologie zu quantifizieren, wenn die Wurzeln die Biokohlepartikel besiedeln. Um den weiteren Effekt der Biokohlen (Nährstofffreisetzung) auf das Wurzelwachstum zu messen, muss der direkte Kontakt zwischen den Pflanzenwurzeln und Biokohlepartikeln ausgeschlossen werden.

Zur Vermeidung des direkten Kontaktes zwischen Pflanzenwurzeln und Biokohlepartikeln können spezielle Rhizoboxen verwendet werden. In diesen Rhizoboxen wachsen die Wurzeln zwischen Nylongaze, so dass der Stoffaustausch nur über das Bodenwasser stattfindet. Obwohl Rhizoboxen Einschränkungen haben (Neumann et al., 2009), ermöglicht die Methode das Wachstum in einem weitgehend ungestörten System und erlaubt eine zerstörungsfreie Beobachtung des Wurzelwachstums.

In der Literatur sind bislang nur drei Rhizoboxexperimente zur Quantifizierung des Einflusses der Anwendung von Biokohle zum Boden auf Wurzelentwicklung und Wurzelmorphologie bekannt (Brennan et al., 2014; Prendergast-Miller et al., 2011; Prendergast-Miller et al., 2014). Prendergast-Miller et al. (2011) fanden heraus, dass die Anwendung von Biokohle (20 und 60 t ha<sup>-1</sup>) das Wurzellängenverhältnis (Wurzellänge/Pflanzenbiomasse) von Weizen erhöhte, während die Pflanzenbiomasse zwischen den Behandlungen ähnlich war. Zum zweiten Experiment wurde berichtet, dass die Pflanzenwurzeln durch die Biokohlepartikel angezogen werden und diese besiedeln (Prendergast-Miller et al., 2014). Bei beiden Versuchen hatten die Pflanzenwurzeln die Möglichkeit, in die Biokohlepartikel im Boden zu wachsen. Trotz der genannten Ergebnisse gibt es noch keine Informationen zu (a) den Effekten von unterschiedlichen Biokohletypen (Pyrolyse, HTC) und (b) den Effekten von Biokohlen auf die Wurzelmorphologie, wenn die Wurzeln keine Möglichkeit haben, in die Biokohlepartikel zu wachsen.

Das Ziel der Studie war, die Effekte der Anwendung der beiden unterschiedlichen Pyrolyse-Biokohlen (Pyro-Biokohle, Pyreg-Biokohle) und der HTC-Biokohle auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen in Rhizoboxen zu quantifizieren. Die Pflanzenwurzeln wuchsen zwischen Nylongaze, aber in der Umwelt des Boden-Biokohle Gemischs, da dies eine Möglichkeit für die partikelfreie Darstellung des Wurzelbildes ist. Es wurde dabei vermutet, dass abhängig von den verschiedenen Ausgangsmaterialien und Produktionsprozessen der Biokohlen, die Biokohleanwendung im Boden das Sprosswachstum und die Wurzelmorphologie unterschiedlich beeinflusst. Außerdem wurden Veränderungen der bodenchemischen Eigenschaften durch Biokohleanwendung quantifiziert und die Möglichkeit der Freisetzung von Nährstoffen aus den Biokohlen getestet, um das Potential der Nährstofffreisetzung zu verdeutlichen.

## 4.2 Material und Methoden

### Biokohleeigenschaften

Es wurden die HTC-Biokohle, Pyro-Biokohle und Pyreg-Biokohle verwendet, die bereits in Abschnitt 2.2 (Material und Methoden) beschrieben wurden.

### Bodeneigenschaften

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wurde lehmiger Sandboden von dem Versuchsfeld in der Nähe von Berge, Brandenburg entnommen. Zusätzlich zu dem bereits im April 2013 für die Gefäßversuche und den ersten Rhizoboxversuch entnommenen Boden (Boden 1), wurde im Oktober 2013 erneut Boden für den zweiten Rhizoboxversuch (Boden 2) entnommen und wie bereits beschrieben analysiert. Die Bodeneigenschaften von Boden 1 und Boden 2 unterschieden sich deutlich (Tab. 13).

**Tabelle 13:** Chemische Eigenschaften der für die Rhizoboxversuche verwendeten Böden (n=2) (TM = Trockenmasse).

	C <sub>t</sub> (% TM)	C <sub>org</sub> (% TM)	N <sub>t</sub> (% TM)	P <sub>DL</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	K <sub>DL</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	pH- Wert
Boden 1 (April) (Versuch 1)	0.79	0.73	0.07	0.10	0.12	6.2
Boden 2 (Oktober) (Versuch 2)	0.60	0.45	0.04	0.12	0.15	6.7

Aus Tabelle 13 werden vor allem die geringeren C<sub>t</sub>-, C<sub>org</sub>-, und N<sub>t</sub>- Gehalte von Boden 2 gegenüber den Gehalten von Boden 1 deutlich. Der Boden 2 hatte erhöhte verfügbare Phosphor- und Kaliumgehalte im Vergleich zu Boden 1. Die pH- Werte lagen im neutralen bis schwach sauren Bereich.

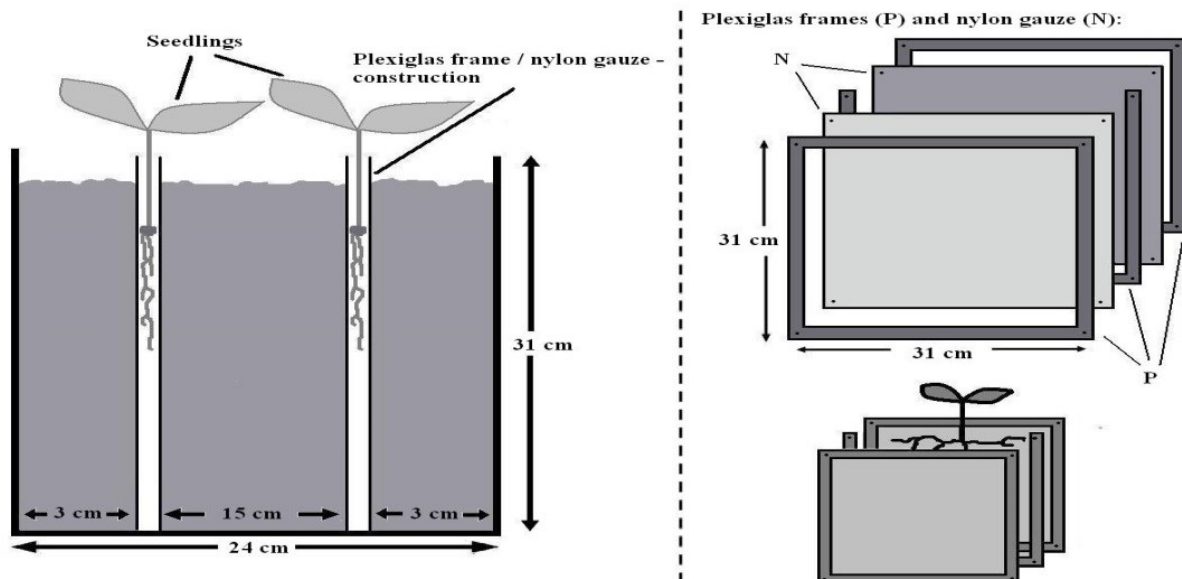
### Rhizoboxversuche

In beiden Rhizoboxversuchen wurde gesiebter Boden (21 kg) gründlich mit zerkleinerten Biokohlen (Pyro, Pyreg, HTC; Partikelgröße ≤ 3 mm) gemischt, um den organischen Kohlenstoffgehalt des Bodens von 0.73 % im ersten Versuch und 0.45 % im zweiten Versuch (Tabelle 13) auf 1.0 % zu erhöhen. Durch die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte der Biokohlen und der Böden wurden im ersten Versuch 82.1 g Pyro-Biokohle, 114.0 g Pyreg-Biokohle sowie 137.7 g HTC-Biokohle und im zweiten Versuch 167.3 g Pyro-Biokohle, 232.2 g Pyreg-Biokohle sowie



280.6 g HTC-Biokohle zum Boden hinzugegeben. Die Kontrolle erhielt keine Biokohle.

Die Rhizoboxen (Höhe: 31 cm, Weite: 24 cm, Länge: 32 cm) wurden von der Firma Schütt Labortechnik GmbH (Deutschland) wie von Gollack et al. (2004) beschrieben, hergestellt (Abb. 12).



**Abbildung 12:** Schematische Darstellung der verwendeten Rhizoboxen.

Der Wurzelraum und der Bodenraum wurden durch zwei Nylongazestücke (Maschenweite 1  $\mu\text{m}$ ) abgetrennt, die in Plexiglasrahmen eingespannt waren. In jede Rhizobox wurden je zwei Plexiglasrahmen-Nylongaze Konstruktionen eingesetzt (Abb. 12) und die Boxen mit Boden oder Boden-Biokohle Gemisch befüllt. Jede Behandlung wurde dreifach wiederholt, so dass 12 Rhizoboxen aufgestellt wurden. In jede Rhizobox wurden zwei vorgekeimte (5 Tage alt) Sommerweizenpflanzen (*Triticum aestivum* L., cv. Chamsin, KWS, Deutschland) zwischen der Nylongaze eingesetzt (Abb. 12). Die Rhizoboxen standen für sechs Wochen im ersten Versuch bzw. für drei Wochen im zweiten Versuch im Gewächshaus (Minimumtemperatur: 15 °C, Durchschnittstemperatur: 18 °C, Maximumtemperatur: 21 °C, relative Luftfeuchtigkeit: 50-60 %, Tageslänge: 12 Stunden).

#### Spross-, Wurzel- und Bodenprobenahme

Im ersten Rhizoboxversuch wurden Spross und Wurzel des Sommerweizens zum Beginn der Blüte (BBCH-Stadium: 61; Meier (1997)) des Hauptsprosses geerntet. Der Spross wurde an der Stammbasis abgeschnitten, bei 60 °C für 48 Stunden

getrocknet und zur Bestimmung des Trockengewichtes gewogen. Die Plexiglasrahmen-Nylongaze Konstruktionen wurden vorsichtig aus den Rhizoboxen herausgezogen und gewaschen, um anhaftende Boden- und Biokohlepartikel zu entfernen. Nach dem Waschen, wurden die Rahmen sowie die Nylongaze entfernt. Die gewaschenen Wurzeln wurden mit einem Flachbildscanner (HP Scanjet 2400) bei einer Auflösung von 600 dpi gescannt. Danach wurden die Wurzeln bei 60 °C für 48 Stunden getrocknet und zur Bestimmung der Trockenmasse gewogen. Die Wurzelbilder wurden digital mit der WinRHIZO 2012b Software (Regent Instruments, Quebec, Canada) ausgewertet.

Der Aufbau des zweiten Rhizoboxversuches war gleich, mit der Ausnahme, dass Spross und Wurzel bereits zum Beginn der Bestockung (BBCH-Stadium: 21-23; Meier (1997)) geerntet wurden. Zusätzlich wurden Bodenproben genommen, luftgetrocknet und gesiebt, um die Gehalte an  $C_t$ ,  $C_{org}$ ,  $N_t$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$  und den pH-Wert mit den zuvor beschriebenen Methoden zu bestimmen.

Darüber hinaus wurden alle drei Biokohlen (Pyro, Pyreg, HTC) im Labor gewaschen, um die Verdünnung von N, P, K, Mg, Fe und Ca in Wasser zu bestimmen. Dafür wurden Schüttelflaschen (500 ml) mit 15 ml destilliertem Wasser und 5 g (2 mm gesiebt) der unterschiedlichen Biokohlen befüllt. Nachdem die Schüttelflaschen 22 Stunden standen, wurde jede Flasche mit 240 ml destilliertem Wasser aufgefüllt und für eine Stunde auf einem Schüttler geschüttelt. Danach blieb die Lösung für 10 Minuten stehen, bevor sie filtriert (Filter: Schleicher & Schüll, Härtegrad: 597.5, Durchmesser: 210 mm) wurde. Jedes Filtrat wurde danach auf die Gehalte von P, K, Mg, Fe, Ca (ICP-OES (Thermo)) und auf die Gehalte von TOC sowie TNb (Liquitoc, Elementar) analysiert.

## Statistik

Alle Parameter wurden mit der einfaktoriellen ANOVA gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ) zur Analyse der signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen getestet (SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows). Daten wurden als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung (SD) berechnet.

### 4.3 Ergebnisse

#### Nährstoffgehalte der Filtrate

Die Biokohlen wurden gewaschen, filtriert und die Nährstoffgehalte der Filtrate gemessen. Das Filtrat der Pyro-Biokohle enthielt dabei die höchsten Gehalte an P, K und Mg (Tab. 14).

**Tabelle 14:** Chemische Eigenschaften der Filtrate der Kohlen (n=2) (TM = Trockenmasse, TNb = gesamter gebundener Stickstoff (total nitrogen bound), TOC = gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon)).

Material	P g kg <sup>-1</sup>	K g kg <sup>-1</sup>	Mg g kg <sup>-1</sup>	Ca g kg <sup>-1</sup>	Fe g kg <sup>-1</sup>	TNb mg l <sup>-1</sup>	TOC mg l <sup>-1</sup>
Pyro-Biokohle	0.55	7.80	0.21	0.15	0.02	0.66	47.46
Pyreg-Biokohle	0.10	4.61	0.03	0.13	0.01	0.74	41.46
HTC-Biokohle	0.26	1.23	0.13	0.27	0.02	4.96	201.13

Das Filtrat der HTC-Biokohle hingegen hatte die höchsten Gehalte an Ca, TNb und TOC im Vergleich zu den pyrolysierten Biokohlen (Tab. 14).

#### Einfluss der Biokohlen auf Bodeneigenschaften

Zur Quantifizierung des Einflusses von Biokohlen auf chemische Bodeneigenschaften wurden nach der Ernte des zweiten Rhizoboxversuches (Beginn der Bestockung) Bodenproben entnommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Biokohlen unterschiedliche Effekte auf die Bodeneigenschaften hatten (Tab. 15).

**Tabelle 15:** Chemische Eigenschaften der Bodenproben (n=3). (Mittelwerte  $\pm$  SD); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Parameter	Kontrolle	Pyro-Biokohle	Pyreg-Biokohle	HTC-Biokohle
C <sub>t</sub> (% TM)	0.62 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	1.00 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	1.03 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.98 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>
C <sub>org</sub> (% TM)	0.43 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.82 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	0.80 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	0.86 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>
N <sub>t</sub> (% TM)	0.050 $\pm$ 0.002 <sup>b</sup>	0.060 $\pm$ 0.002 <sup>ab</sup>	0.059 $\pm$ 0.007 <sup>ab</sup>	0.064 $\pm$ 0.004 <sup>a</sup>
P <sub>DL</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0.102 $\pm$ 0.004 <sup>a</sup>	0.120 $\pm$ 0.013 <sup>a</sup>	0.113 $\pm$ 0.009 <sup>a</sup>	0.112 $\pm$ 0.015 <sup>a</sup>
K <sub>DL</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0.137 $\pm$ 0.019 <sup>b</sup>	0.182 $\pm$ 0.013 <sup>a</sup>	0.147 $\pm$ 0.005 <sup>b</sup>	0.124 $\pm$ 0.010 <sup>b</sup>
pH-Wert	6.84 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	7.00 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	7.11 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	6.71 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>

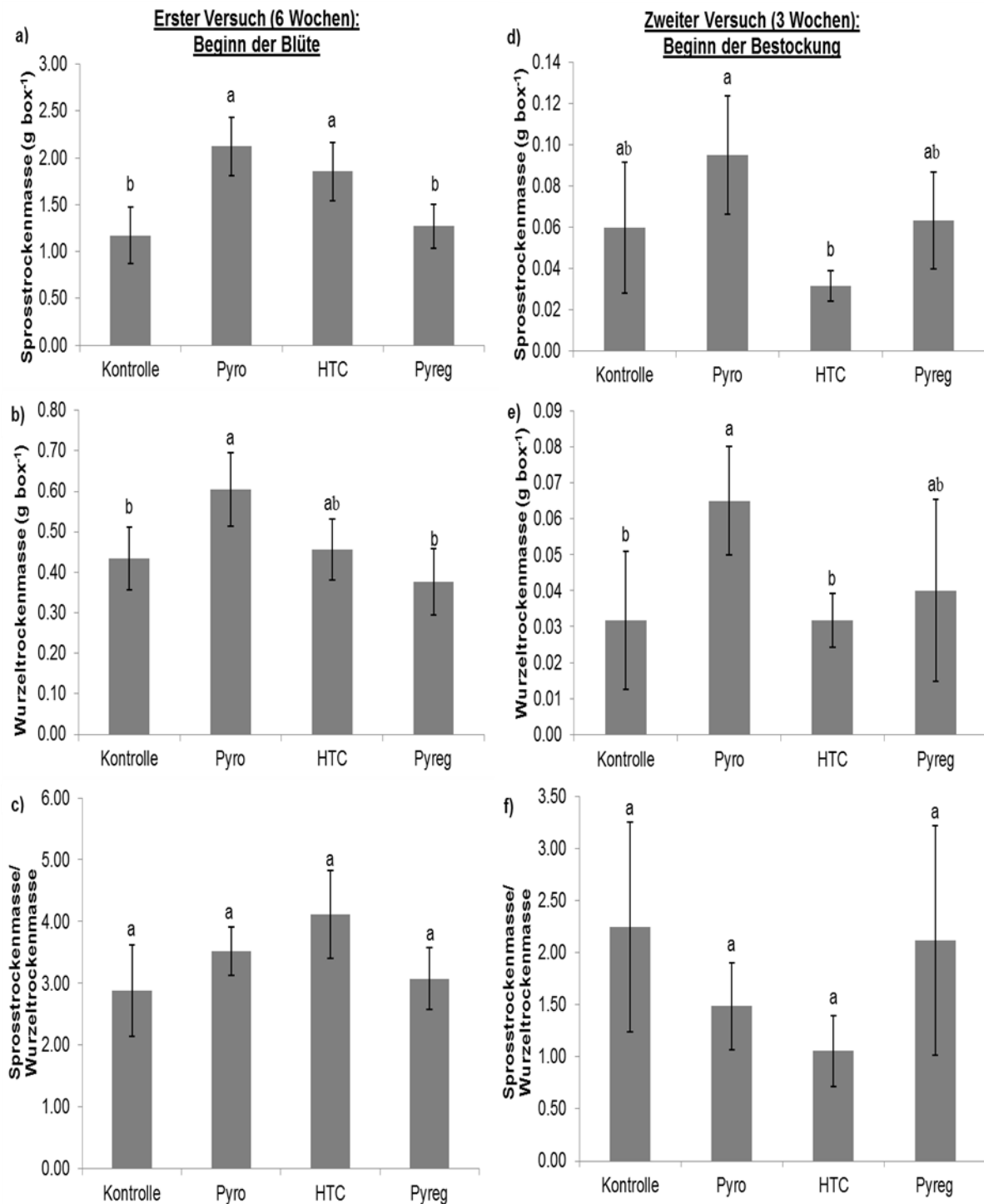
Das angestrebte Ziel der Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehaltes auf 1.0 % wurde nicht ganz erreicht. Die organischen Kohlenstoffgehalte lagen zwischen 0.80 % und 0.86 % TM. Die Anwendung von HTC-Biokohle erhöhte den  $N_t$ -Gehalt signifikant (0.064 % TM) im Vergleich zur Kontrolle (0.050 % TM). Die Biokohlen hatten keinen Einfluss auf den pflanzenverfügbaren Phosphor ( $P_{DL}$ ). Die Anwendung von Pyro-Biokohle zum Boden wirkte sich positiv auf das pflanzenverfügbare Kalium ( $K_{DL}$ ) im Vergleich zur Kontrolle und den anderen Behandlungen aus. Die pyrolysierten Biokohlen (Pyro, Pyreg) hatten ebenfalls einen signifikant positiven Einfluss auf den pH-Wert im Vergleich zur Kontrolle und HTC-Biokohle (Tab. 15).

#### Spross- und Wurzelbiomasse von Sommerweizen

Die Sprossbiomasse von Sommerweizen zum Beginn der Blüte (Versuch 1) zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Abb. 13a). Die Anwendung von Pyro-Biokohle ergab die höchste Sprosstrockenmasse ( $2.12 \pm 0.31$  g). Die Sprosstrockenmasse in der Variante mit HTC-Biokohle ( $1.85 \pm 0.31$  g) war ebenfalls signifikant höher im Vergleich zu den Behandlungen Kontrolle und Pyreg-Biokohle. Im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle hatte die Anwendung von Biokohlen keine negativen Effekte auf die Sprosstrockenmassen von Sommerweizenpflanzen, die sechs Wochen in Rhizoboxen wuchsen (Abb. 13a).

Bei der Probenahme zum Zeitpunkt Beginn der Bestockung waren die Sprosstrockenmassen von Sommerweizen ebenfalls in der Variante Boden gemischt mit Pyro-Biokohle am höchsten ( $0.10 \pm 0.03$  g) und in der Variante mit HTC-Biokohle am geringsten ( $0.03 \pm 0.01$  g). Im Vergleich zur Kontrolle zeigte die Anwendung von Pyreg-Biokohle keine Effekte auf die Sprosstrockenmasse von Sommerweizen (Abb. 13d).

In beiden Versuchen ergab die Anwendung von Pyro-Biokohle zum Boden einen signifikanten Anstieg der Wurzeltrockenmasse von Sommerweizen. Zum Beginn der Blüte hatten die Pflanzen in der Pyro-Biokohle Behandlung eine signifikant höhere Wurzeltrockenmasse ( $0.61 \pm 0.09$  g) im Vergleich zur Kontrolle ( $0.43 \pm 0.08$  g) und Pyreg-Biokohle Behandlung ( $0.38 \pm 0.08$  g) (Abb. 13b). Zum Beginn der Bestockung war die Wurzeltrockenmasse von Sommerweizen in der Pyro-Biokohle Variante mit  $0.07 \pm 0.02$  g deutlich höher als die Wurzeltrockenmasse in der Kontrolle ( $0.03 \pm 0.02$  g) und HTC-Biokohle Variante ( $0.03 \pm 0.02$  g) (Abb. 13e).



**Abbildung 13:** Spross- (a, d) und Wurzeltrockenmassen (b, e) sowie Spross:Wurzel-Verhältnis (c, f) des ersten Rhizoboxversuchs (a, b, c) und des zweiten Rhizoboxversuchs (d, e, f) (n=6). (MW  $\pm$  SD); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Obwohl es Unterschiede in der Spross- und Wurzeltrockenmasse von Sommerweizen gab, unterschied sich das Spross:Wurzel-Verhältnis zwischen den Behandlungen in beiden Versuchen nicht (Abb. 13c+f).

## Wurzelmorphologie von Sommerweizen

Ausgewählte Wurzelparameter von Sommerweizen im ersten (Beginn der Blüte) und im zweiten Versuch (Beginn der Bestockung) wurden unterschiedlich durch die Anwendung der Biokohlen zum Boden beeinflusst (Tab. 16).

**Tabelle 16:** Parameter der Wurzelmorphologie von Sommerweizen im Boden (Kontrolle) oder Boden gemischt mit Biokohlen (Pyro, Pyreg, HTC). (MW  $\pm$  SD); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Parameter	Einheit	Kontrolle	Pyro-Biokohle	HTC-Biokohle	Pyreg-Biokohle
<b>1. Versuch: Beginn Blüte</b>					
Wurzel-länge	cm	2758 $\pm$ 418 <sup>ab</sup>	3063 $\pm$ 395 <sup>a</sup>	3042 $\pm$ 388 <sup>a</sup>	2249 $\pm$ 228 <sup>b</sup>
Spezielle Wurzel-länge	Wurzellänge/Wurzel-biomasse (cm mg <sup>-1</sup> )	7.6 $\pm$ 2.8 <sup>a</sup>	5.1 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	7.3 $\pm$ 2.00 <sup>a</sup>	5.7 $\pm$ 1.2 <sup>a</sup>
Verhältnis Wurzel-gewicht	Wurzelbiomasse/Pflanzenbiomasse (mg mg <sup>-1</sup> )	0.33 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	0.29 $\pm$ 0.0 <sup>ab</sup>	0.24 $\pm$ 0.0 <sup>b</sup>	0.34 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>
Verhältnis Wurzel-länge	Wurzellänge/Pflanzen-biomasse (cm mg <sup>-1</sup> )	2.5 $\pm$ 0.6 <sup>a</sup>	1.5 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	1.7 $\pm$ 0.4 <sup>ab</sup>	1.9 $\pm$ 0.4 <sup>ab</sup>
Wurzel-oberfläche	cm <sup>2</sup>	549 $\pm$ 118 <sup>a</sup>	720 $\pm$ 94 <sup>a</sup>	651 $\pm$ 94 <sup>a</sup>	569 $\pm$ 67 <sup>a</sup>
Wurzel-spitzen	Anzahl	3534 $\pm$ 1088 <sup>a</sup>	3066 $\pm$ 304 <sup>a</sup>	2969 $\pm$ 897 <sup>a</sup>	2296 $\pm$ 231 <sup>a</sup>
<b>2. Versuch: Beginn Bestockung</b>					
Wurzel-länge	cm	780 $\pm$ 238 <sup>a</sup>	1126 $\pm$ 194 <sup>a</sup>	391 $\pm$ 58 <sup>b</sup>	1069 $\pm$ 306 <sup>a</sup>
Spezielle Wurzel-länge	Wurzellänge/Wurzel-biomasse (cm mg <sup>-1</sup> )	29.5 $\pm$ 11.1 <sup>ab</sup>	18.9 $\pm$ 8.6 <sup>ab</sup>	12.9 $\pm$ 3.2 <sup>b</sup>	35.6 $\pm$ 19.4 <sup>a</sup>
Verhältnis Wurzel-gewicht	Wurzelbiomasse/Pflanzenbiomasse (mg mg <sup>-1</sup> )	0.5 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	0.7 $\pm$ 0.3 <sup>ab</sup>	1.1 $\pm$ 0.5 <sup>a</sup>	0.6 $\pm$ 0.2 <sup>ab</sup>
Verhältnis Wurzel-länge	Wurzellänge/Pflanzen-biomasse (cm mg <sup>-1</sup> )	14.1 $\pm$ 4.7 <sup>a</sup>	13.2 $\pm$ 5.9 <sup>a</sup>	12.7 $\pm$ 2.5 <sup>a</sup>	17.55 $\pm$ 3.4 <sup>a</sup>
Wurzel-oberfläche	cm <sup>2</sup>	141 $\pm$ 45 <sup>ab</sup>	206 $\pm$ 32 <sup>a</sup>	70 $\pm$ 9 <sup>b</sup>	182 $\pm$ 78 <sup>a</sup>
Wurzel-spitzen	Anzahl	860 $\pm$ 222 <sup>ab</sup>	950 $\pm$ 163 <sup>ab</sup>	722 $\pm$ 170 <sup>b</sup>	1143 $\pm$ 344 <sup>a</sup>

Zum Beginn der Blüte (1. Versuch) ergab die Anwendung von Pyro- und HTC-Biokohle signifikant längere Wurzeln im Vergleich zur Pyreg-Biokohleanwendung, wohingegen die spezielle Wurzellänge (Wurzellänge/Wurzelbiomasse) keine

signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen zeigte. Die Kontrolle sowie die Behandlung mit Pyreg-Biokohle wiesen höhere Wurzelgewichtsverhältnisse (Wurzelbiomasse/Pflanzenbiomasse) im Vergleich zur Behandlung HTC-Biokohle auf. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen in der Wurzeloberfläche und der Anzahl an Wurzelspitzen. Dennoch war zu Beginn der Blüte die Anzahl an Wurzelspitzen im Durchschnitt 3.3fach höher als zu Beginn der Bestockung (Tab. 16).

Im Vergleich zu den Einflüssen der geprüften Biokohlen auf die Wurzelparameter zum Beginn der Blüte (1. Versuch), wurden die Parameter im zweiten Versuch (Beginn der Bestockung) differenziert beeinflusst. Die Kontrolle sowie die Anwendung von Pyro- und Pyreg-Biokohle zeigten höhere Wurzellängen im Vergleich zur Anwendung von HTC-Biokohle zum Boden (Abb. 14 und Tab. 16).



**Abbildung 14:** Wurzelmorphologie nach der Anwendung von Pyro-Biokohle (links) und HTC-Biokohle (rechts) vom 2. Rhizoboxversuch.

Die spezielle Wurzellänge wies ebenfalls Unterschiede zwischen den Behandlungen Pyreg-Biokohle und HTC-Biokohle auf. Das Wurzelgewichtsverhältnis wurde im Vergleich zur Kontrolle signifikant durch die Anwendung von HTC-Biokohle beeinflusst. Die Oberfläche der Wurzeln in der Variante mit Pyro-Biokohle war signifikant höher im Vergleich zur Variante mit HTC-Biokohle. Auch die Anzahl an Wurzelspitzen wurde im zweiten Versuch signifikant durch die Anwendung der Pyreg-Biokohle im Vergleich zur Anwendung von HTC-Biokohle beeinflusst (Tab. 16).

#### 4.4 Diskussion

##### Einfluss von Ausgangsmaterial und Produktionsprozess auf chemische Eigenschaften der Biokohlen

Die in den Versuchen verwendeten Biokohlen unterschieden sich sowohl im Ausgangsmaterial als auch im Herstellungsprozess. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Effekte auf Spross- und Wurzelwachstum erwartet. Die aus Maissilage hergestellte Pyro-Biokohle hatten in beiden Versuchen positive Effekte auf die Wurzeltrockenmasse von Sommerweizen. Im Gegensatz dazu zeigte die ebenfalls aus Maissilage hergestellte HTC-Biokohle positive Effekte auf die Spross- und Wurzeltrockenmasse im ersten Versuch (Beginn der Blüte) und negative Effekte im Zweiten (Beginn der Bestockung).

Obwohl beide Biokohlen aus dem gleichen Ausgangsmaterial hergestellt wurden, unterschied sich der Produktionsprozess erheblich. Die HTC-Biokohle wurde durch die Hydrothermale Carbonisierung bei 210 °C bei einem Druck von 23 bar für 8 Stunden hergestellt, während die Pyro-Biokohle durch die Pyrolyse bei 600 °C für 30 Minuten produziert wurde (Mumme und Diakité, 2013). Durch die unterschiedlichen Produktionsprozesse (Pyro, HTC) haben die Biokohlen verschiedene chemische Eigenschaften (Tab. 1). Mit Blick auf den pH-Wert zeigen Pyro-Biokohle und Pyreg-Biokohle höhere Werte als HTC-Biokohle (Tab. 1), was ähnliche Beobachtungen von Sun et al. (2014) bestätigt. Pyro-Biokohle hat außerdem höhere Gehalte an Ca, Fe, Mg, K und P im Vergleich zu HTC-Biokohle, welches ebenfalls übereinstimmend mit der Studie von Sun et al. (2014) ist.

Pyro-Biokohle und Pyreg-Biokohle sind pyrolysierte Biokohlen, die sowohl aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien als auch durch verschiedene Produktionsparameter entstanden sind. Abfälle der Holzhackschnitzelproduktion



wurden für die Herstellung der Pyreg-Biokohle für 30 Minuten bei 850 °C pyrolysiert (Mumme und Diakité, 2013). Es ist bekannt, dass Biokohlen aus Holz oder Holzabfällen höhere Gesamtkohlenstoffgehalte, geringere Aschegehalte und geringere Gehalte an N, Fe, Mg, K und P im Vergleich zu Biokohlen produziert aus Stallmist aufweisen (Singh et al., 2010). Die Pyrolysetemperatur zur Produktion der Pyreg-Biokohle war um 150 °C höher als die Temperatur zur Produktion der Pyro-Biokohle. Pyrolysetemperaturen bis zu 600 °C erhöhten den Kohlenstoffgehalt der Biokohlen in der Studie von Sun et al. (2014).

Während unterschiedliche Prozessbedingungen und chemische Eigenschaften zwischen Pyro-Biokohle und Pyreg-Biokohle zum Stadium der Bestockung keine Wirkungen auf Sommerweizenpflanzen hatten, zeigten die Pflanzen zum Beginn der Blüte höhere Spross- und Wurzeltrockenmassen bei der Anwendung von Pyro-Biokohle zum Boden im Vergleich zur Anwendung von Pyreg-Biokohle.

#### Chemische Eigenschaften der Filtrate der Biokohlen

Die Biokohlen wurden mit destilliertem Wasser gewaschen, um zu untersuchen, ob die in den Biokohlen enthaltenen Nährstoffe löslich sind. In einer vorherigen Studie wurden Biokohlen mit Milli-Q-Wasser (Reinstwasser (Typ I)) behandelt (Wu et al., 2011), um die an der Kohle gebundenen Nährstoffe zu analysieren. Da Milli-Q-Wasser nicht repräsentativ für die natürliche Bodenlösung im Feld ist, wurden die in dieser Studie verwendeten Biokohlen mit destilliertem Wasser gewaschen. Die Filtrate der Pyro-Biokohle wiesen im Durchschnitt höhere Gehalte an P, K, Mg und Fe im Vergleich zur Pyreg- und HTC-Biokohle auf. Diese höheren Gehalte werden als Grund für die positiven Effekte der Anwendung von Pyro-Biokohle zum Boden in beiden Versuchen angenommen.

Prendergast-Miller et al. (2014) zeigten, dass Wurzeln durch Biokohlepartikel angezogen werden und diese besiedeln. Eine mögliche Erklärung dafür könnten die verfügbaren Nährstoffgehalte (vor allem Kalium) sein. Potenziell besteht die Möglichkeit, dass sich Wurzeln Nährstoffe aneignen, wenn sie in die Biokohlepartikel einwachsen.

#### Effekte der Biokohlen auf Bodeneigenschaften

Im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle hatte die HTC-Biokohle einen positiven Effekt auf den Stickstoffgehalt des Bodens. Der Grund dafür ist der höhere

Stickstoffgehalt der HTC-Biokohle, da in den Bodenproben aus den Biokohlevarianten die Biokohlepartikel nicht herausgefiltert worden sind und deshalb in den Proben enthalten waren. Die pyrolysierten Biokohlen hatten keinen Einfluss auf den N-Gehalt des Bodens. Chan et al. (2007) fanden keine Beeinflussung des Bodenstickstoffgehaltes bei einer Anwendung von Biokohle produziert aus Grünschnitt. Ein Stickstoffdüngeneffekt durch die Anwendung der Biokohlen in den durchgeführten Rhizoboxversuchen ist unwahrscheinlich, da mit den Biokohlen dem Boden nur geringe Mengen an Stickstoff zugeführt werden.

Pflanzenverfügbare Phosphor ( $P_{DL}$ ) wurde durch die Anwendung der Biokohlen nicht beeinflusst, weil die Biokohlen einen geringen Phosphorgehalt aufwiesen und deshalb nur wenig Phosphor dem Boden (1-4 % im Vergleich zur Kontrolle) zugefügt wurde. Daraus lässt sich ein Phosphordüngungseffekt durch die Anwendung der Biokohlen nahezu ausschließen. Im Gegenteil dazu hatte die Pyro-Biokohle einen positiven Effekt auf das pflanzenverfügbare Kalium ( $K_{DL}$ ) des Bodens. Pyro-Biokohle hatte einen höheren Kaliumgehalt ( $32.26 \text{ g kg}^{-1}$ ) als Pyreg- und HTC-Biokohle. Im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle wurden durch die Anwendung von Pyro-Biokohle zum Boden 40 % Kalium hinzugefügt. Da bekannt ist, dass Kalium positive Effekte auf den Wasserhaushalt von Pflanzen und die Photosynthese hat, können die positiven Effekte auf das Pflanzenwachstum in den Rhizoboxen mit Pyro-Biokohle auf einem Kaliumdüngungseffekt beruhen.

Die Anwendungen von Pyro- und Pyreg-Biokohle erhöhten die pH-Werte des Bodens im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle und zur HTC-Biokohle Behandlung signifikant. Allerdings sind Effekte der unterschiedlichen pH-Werte auf die Nährstoffverfügbarkeit sowie Spross- und Wurzeltrockenmassen unwahrscheinlich, da der Weizen einen relativ breiten pH-Wert Bereich (4,1-7,4) toleriert (Mengel und Kirkby, 2001).

#### Einfluss von Erntezeitpunkt und unterschiedlichen Mengen der Biokohlen auf Spross- und Wurzelentwicklung

Im Vergleich zu den vielen Studien über das Sprosswachstum von Kulturpflanzen ist wenig über Wurzelsysteme, Rhizosphäre und Wurzel-Spross Interaktionen während des Pflanzenwachstums und der Pflanzenentwicklung bekannt, da die Probenahme und Auswertung der Wurzelmorphologie mühsam, zeitaufwendig und oft ungenau ist (Zoon und Tienderen, 1990). Wenn spezielle Rhizoboxen für die Studien des

Wurzelwachstums verwendet werden, wachsen die Wurzeln zwischen Nylongaze. Dadurch wird die Auswertung der Wurzelmorphologie deutlich erleichtert und verbessert. In diesen Versuchen wurde Nylongaze mit einer Maschenweite von 1  $\mu\text{m}$  verwendet, um auszuschließen, dass Wurzelhaare (12  $\mu\text{m}$  Durchmesser) (Singh Gahoonia et al., 1997) die Möglichkeit haben, durch die Nylongaze zu wachsen.

Prendergast-Miller et al. (2014) beobachteten eine begünstigte Wasser- und Nährstoffaufnahme durch direkte Interaktionen zwischen holzigen Biokohlepartikeln und Weizenwurzeln. Aus den Rhizoboxversuchen geht hervor, dass Biokohlen das Spross- und Wurzelwachstum auch indirekt begünstigen können, da die Wurzeln keine Möglichkeiten hatten, in die Biokohlepartikel zu wachsen. Neben direkten sind daher auch indirekte Begünstigungen bei der Anwendung von Biokohlen zum Boden möglich. Diese Beeinflussung könnte für die Praxis relevant sein, da es im Feld derzeit noch nicht möglich ist, die Biokohle homogen auszubringen und in den Boden einzumischen.

Im ersten Versuch wurden die Pflanzen zum Beginn der Blüte, ein wichtiges Stadium für die Ertragsentwicklung, geerntet. Allerdings ist für die vorliegende Studie der zweite Versuch (Bestockung) relevanter. Es ist ebenfalls möglich, dass Biokohlen unterschiedliche Einflüsse in den verschiedenen Entwicklungsstadien (vegetativ und generativ) haben.

Zusätzlich können die höheren Biokohlemengen im zweiten Versuch einen Einfluss auf die Spross- und Wurzelentwicklung gehabt haben. In beiden durchgeführten Versuchen hatte die Pyro-Biokohle positive Effekte unabhängig von der hinzugefügten Menge. Im ersten Versuch wurden 137.7 g HTC-Biokohle und im zweiten 280.6 g, also die doppelte Menge, in den Boden eingemischt. Zum Beginn der Blüte hatte die HTC-Biokohle positive Effekte auf die Sprosstrockenmasse im Vergleich zur Kontrolle und Pyreg-Biokohle Behandlung. Zum Zeitpunkt der Bestockung (2. Versuch) wurde die Sprosstrockenmasse negativ durch die Anwendung von HTC-Biokohle beeinflusst. Die differenzierte Wirkung der HTC-Biokohle kann sowohl ein Effekt des Entwicklungsstadiums und/oder der unterschiedlichen hinzugegebenen Mengen sein. Aus der Literatur ist ein reduziertes Wachstum bei der Anwendung von HTC-Biokohlen bekannt (Bargmann et al., 2014c; Gajić und Koch, 2012; Rillig et al., 2010). Deshalb können die höheren HTC-

Biokohlemengen in Kombination mit einem früheren Entwicklungsstadium im zweiten Versuch (Beginn der Bestockung) ein Grund für die negativen Effekte auf Spross- und Wurzeltrockenmassen von Sommerweizen sein. Ähnliche Effekte auf die Keimung von Sommergerste wurden bei der Verwendung von hohen Mengen einer HTC-Biokohle gefunden (Bargmann et al., 2014c).

### Wurzelmorphologie

Pyro- und HTC-Biokohle hatten positive Effekte auf die Wurzellänge von Sommerweizen im Vergleich zur Pyreg-Biokohle Behandlung im ersten Versuch (Beginn der Blüte). Mögliche Erklärungen sind die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien der Biokohlen, die unterschiedlichen Prozessparameter oder eine Kombination aus beiden. Allerdings lassen die durchgeführten Versuche keine genauen Rückschlüsse zu. Im zweiten Versuch zeigte die Anwendung von HTC-Biokohle aufgrund der erhöhten applizierten Mengen negative Effekte auf die Wurzellänge im Vergleich zu den anderen Behandlungen und der unbehandelten Kontrolle. Ein Nährstoffmangel der Pflanzen in der HTC-Biokohle Variante könnte zu einem erhöhten Wurzelwachstum und einem geringeren Sprosswachstum geführt haben, um den Mangel auszugleichen. Die Wurzeloberfläche zeigte einen ähnlichen Effekt. Die spezielle Wurzellänge (Länge pro Gewichtseinheit der Wurzeln) wurde im ersten Versuch nicht beeinflusst. Im zweiten Versuch allerdings, hatte die Anwendung der HTC-Biokohle eine signifikant geringere spezielle Wurzellänge als die Wurzeln in der Pyreg-Biokohlebehandlung. Der Einfluss der Anwendung von HTC-Biokohle auf das Wurzelgewichtsverhältnis war ebenfalls differenziert. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Makoto et al. (2010) stieg die Anzahl an Wurzelspitzen mit der Anwendung von Pyreg-Biokohle zum Beginn der Bestockung (2. Versuch) an.

#### 4.5 Schlussfolgerungen

Die Versuche zeigen, dass Rhizoboxen für Studien des Spross- und Wurzelwachstums sowie der Wurzelmorphologie in unterschiedlichen Entwicklungsstadien geeignet sind. Außerdem konnten die Ergebnisse der Rhizoboxversuche die Frage beantworten, wie die Wurzelmorphologie von Sommerweizen durch die Anwendung von unterschiedlichen Biokohlen zum Boden beeinflusst wird, wenn die Wurzeln in der Umgebung des Boden-Biokohle Gemischs wachsen. Deshalb kann geschlussfolgert werden, dass die Nährstoffgehalte der Biokohlen bedeutsam für die unterschiedlichen Effekte auf Spross- und Wurzelwachstum sowie Wurzelmorphologie sind. HTC-Biokohle hatte einen geringeren pH-Wert und Kohlenstoffgehalt als pyrolysierte Biokohlen. Das Ausgangsmaterial und die Prozessparameter der Pyrolyse beeinflussen die chemischen Eigenschaften der Biokohlen. Nährstoffe können aus der Biokohle ausgewaschen und über die Bodenlösung transportiert werden, was einen Effekt auf die Spross- und Wurzelentwicklung von Sommerweizen hatte. Wenn Boden mit Biokohlen gemischt wurde, hatten die Biokohlen unterschiedliche Effekte auf die bodenchemischen Eigenschaften. Des Weiteren sind Erntezeitpunkt und Menge der getesteten Biokohlen bedeutsam für die Einflüsse auf Spross- und Wurzeltrockenmasse sowie Wurzelmorphologie. Generell zeigte der Vergleich unterschiedlicher Biokohlen differenzierte Effekte auf Spross- und Wurzelwachstum sowie Bodenveränderungen abhängig von Ausgangsmaterial, Produktionsprozess und hinzugegebener Menge. Anhand der differenzierten Wirkungen der Biokohlen in den Rhizoboxversuchen sind weitere Studien zum Produktionsprozess und den Wirkungen unterschiedlicher Ausgangsmaterialien notwendig.

## 5 Kapitel 4: Sorption von Stickstoff an Biokohlen

### 5.1 Einleitung

Stickstoff ist ein essentieller Makronährstoff für das Wachstum von Pflanzen (Mengel und Kirkby, 1982). Seit der zweiten Hälfte des 20ten Jahrhunderts nahmen in vielen Regionen der Welt die Anwendungen von organischem und anorganischem Stickstoff in der landwirtschaftlichen Praxis zu (Mosier et al., 2001). Neben dem positiven Effekt der Stickstoffdüngung auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag, kam es durch die vermehrte Nutzung von Stickstoff zu nachteiligen Effekten, wie z.B. das vermehrte Auftreten von  $\text{NO}_3^-$  im Grundwasser (Pierzynski et al., 1994).

Stickstoff ist im Boden in organischer und anorganischer Form vorhanden. Mehr als 90 % des im Boden vorkommenden Stickstoffs befinden sich im organischen Pool und müssen durch Mikroorganismen mineralisiert werden, um pflanzenverfügbar zu sein. Häufig vorkommende Formen von anorganischem Stickstoff sind Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) und Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Bei der Ausbringung von Ammonium als Stickstoffdünger oder bei der Freisetzung von Ammonium in die Bodenlösung durch Mineralisierung, wird Ammonium durch mikrobiologische Nitrifikation unter aeroben Bedingungen zu  $\text{NO}_3^-$  (Schmidt, 1982). Anders als Ammonium ist Nitrat in Wasser leicht löslich und damit auswaschungsgefährdet. Unter anaeroben Bedingungen kann es zur Denitrifikation von  $\text{NO}_3^-$  zu  $\text{N}_2\text{O}$  oder  $\text{N}_2$  kommen. Durch Auswaschung und Denitrifikation entstehen Stickstoffverluste in Agrarökosystemen und damit das Potential für Umweltprobleme.

In Mitteleuropa ist Ammoniumnitrat sowohl in Einzel- wie in Mehrnährstoffdüngern die vorherrschende Stickstoffverbindung. Die Hälfte des Stickstoffs liegt im Ammoniumnitrat als Nitrat vor. Deshalb wird schon während der langsamen Erwärmung der Böden im Frühjahr eine gute Anfangswirkung erzielt. Bei der oberflächlichen Ausbringung von ammoniumnitrathaltigen Düngemitteln kommt es kaum zu Stickstoffverlusten durch Verflüchtigung. Außerdem vermindern geringe Bodentemperaturen im Frühjahr die Nitrifizierung von Ammoniumstickstoff (Schilling, 2000).

Weltweit gesehen stellt Harnstoff den am häufigsten verwendeten Stickstoffdünger dar. Harnstoff hat mit 46 % N den höchsten Gehalt der im Handel verfügbaren festen Stickstoffdünger (Schilling, 2000). Harnstoff wird durch das Enzym Urease zu

Ammoniumcarbonat hydrolysiert und kann bei entsprechenden Bedingungen in Form von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) freigesetzt werden. In biologisch aktiven Böden und bei ausreichender Feuchtigkeit und Temperatur erfolgt die Hydrolyse innerhalb weniger Tage, was zu einem Anstieg des pH-Wertes in der Nähe des Düngekorns führen kann. Dadurch ergeben sich auf neutralen und bis schwach sauren Böden Verluste durch Verflüchtigung, wenn diese schlecht gepuffert sind (Schilling, 2000).

Im Boden liegen zwischen 20 und 51 % des Gesamtstickstoffs der organischen Bodensubstanz (SOM) in Form von verschiedenen Aminosäuren vor, der durch saure Hydrolyse löslich und verfügbar wird (Aldag und Kickuth, 1973; Senwo und Tabatabai, 1998; Stevenson, 1982). Friedel und Scheller (2002) fanden heraus, dass der Gehalt an hydrolysierbaren Aminosäuren in Bodenproben von Grünland- und Waldböden höher war als der Gehalt in Ackerböden und mit dem Gehalt an Gesamtstickstoff im Boden ( $\text{N}_t$ ) und dem gesamten organischen Kohlenstoffgehalt (TOC) korreliert.

Die Quantifizierung der jeweiligen Beteiligung von Stickstoffquellen an verschiedenen Transformationsprozessen (z.B. N-Aufnahme, Mineralisierung, Immobilisierung, gasförmige Freisetzung) ist aufgrund gleicher chemischer Identität des Stickstoffs bei der Gesamtstickstoffbestimmung nicht ohne weiteres möglich. Deshalb wird das stabile Isotop  $^{15}\text{N}$  von Stickstoff genutzt, um die Prozesse im System Pflanze - Boden auf der Ebene, die von Experimenten unter kontrollierten Bedingungen bis zu Agrarökosystemen reicht, zu untersuchen. Stickstoff kommt in der Natur in molekularer Form vor. Unter natürlichen Bedingungen ist  $^{15}\text{N}$  zu 0.366 und  $^{14}\text{N}$  zu 99.634 Atom-Prozent vorhanden. Bei der Anwendung der  $^{15}\text{N}$ -Isotopenverdünnungstechnik werden mit  $^{15}\text{N}$  angereicherte Verbindungen (Atom-%  $^{15}\text{N} > 0.366$ ) eingesetzt, die Isotopenverhältnisse von  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  mittels Massenspektrometer gemessen, wodurch dann die quantitative Bestimmung von  $^{15}\text{N}$  im interessierenden Kompartiment ermöglicht wird.

Biokohlen haben das Potential, Nährstoffe wie Stickstoff oder Phosphor von Lösungen zu sorbieren (Zhang et al., 2012). Es wurde auch beschrieben, dass Biokohlen Nährstoffe für das Pflanzenwachstum liefern und die Auswaschung von Nährstoffen mindern können (Lehmann et al., 2003; Major et al., 2010).

Seit kurzem wird die Aufladung der Biokohlen mit organischen Nährstoffen durch beispielsweise Kompost oder Gärrest vor der Ausbringung der Biokohlen intensiver

untersucht (Alburquerque et al., 2013; Bruun et al., 2012; Joseph et al., 2013; Schulz und Glaser, 2012). Obwohl bekannt ist, dass die Biokohlen Nährstoffe sorbieren, fehlen bisher Erkenntnisse zur Reversibilität der Bindung von Elementen an unterschiedlichen Biokohlen. Eine Beladung der Biokohlen mit Nährstoffen wäre sinnvoll, wenn der Stickstoff dann aus den Biokohlen wieder freigesetzt wird und somit pflanzenverfügbar ist.

Das Ziel dieser Studie war es, das Sorptionsverhalten von zwei ausgewählten Biokohlen, die sich in ihren Eigenschaften besonders unterscheiden, zu untersuchen, wenn sie *in vitro* mit gelösten anorganischen und organischen N-Quellen in Abhängigkeit von der Zeit behandelt werden.

## 5.2 Material und Methoden

### Biokohlen

Es wurden von den beschriebenen Biokohlen (Abschnitt 2.2) die Pyro-Biokohle und die HTC-Biokohle aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsprozesse und Eigenschaften verwendet.

### Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden die Biokohlen bei 60 °C getrocknet und auf 2 mm gesiebt. In 2 ml Reaktionsgefäße (Eppendorf, Deutschland) wurden jeweils 150 mg Biokohle eingewogen und mit 1,5 ml Lösung der jeweiligen Stickstoffquelle (siehe Tabelle 17) versetzt. Als Kontrolle wurden die beiden Biokohlen mit abgekochtem, deionisiertem Wasser behandelt. Die Gefäße verblieben nach dem Ansatz bei einer konstanten Temperatur von 15 °C in einem Brutschrank (Mettler GmbH & Co. KG, Deutschland). Die Probenahmen erfolgten nach 2, 15 und 30 Tagen. Um die Reversibilität der Absorption der verschiedenen N-Quellen in Abhängigkeit von der Inkubationszeit zu bestimmen, wurden die Biokohlen auch nach einer Waschung mit abgekochtem deionisiertem Wasser untersucht. Somit hatte dieses Laborexperiment die Faktoren Biokohle (Pyro, HTC), Stickstoffquelle (Tabelle 17), Termin (2, 15, 30 Tage) und Waschen (ohne, mit). Alle Faktorstufen wurden miteinander kombiniert und dreifach wiederholt.



## Stickstoffquellen und $^{15}\text{N}$ Gehalte

In Tabelle 17 sind die verwendeten Stickstoffquellen aufgeführt. Sie lassen sich in anorganische Verbindungen (Nr. 2-5) und organische Verbindungen (Aminosäuren, Nr. 6-9) unterteilen. Um außerdem die Wirkung eines mikrobiellen Proteins auf die Biokohlen zu untersuchen, wurde lyophilisiertes Hefeprotein (Nr. 10) mitgeführt. Alle Stickstoffverbindungen waren sehr hoch mit  $^{15}\text{N}$  angereichert, da die  $^{15}\text{N}$ -Markierung bei allen Stickstoffquellen bei über 87 Atom-%  $^{15}\text{N}$  lag.

**Tabelle 17:** Stickstoffquellen und deren  $^{15}\text{N}$ -Markierung (Atom-%  $^{15}\text{N}$ ),  $^{15}\text{N}$ -Gehalte ( $\text{mg } ^{15}\text{N g}^{-1}$ ) und N-Gehalte (%).

Nr.	N-Quelle	Atom-% $^{15}\text{N}$	$\text{mg } ^{15}\text{N g}^{-1}$	N-Gehalt (%)
1	Wasser	0.37	n.b.	n.b.
2	Ammonium	98.0	274.8	26.17
3	Nitrat	98.0	145.4	13.85
4	Ammoniumnitrat	98.0	367.3	34.98
5	Harnstoff	95.0	474.5	46.62
6	Valin (Val)	94.2	120.6	11.95
7	Phenylalanin (Phe)	96.4	87.5	8.47
8	Isoleucin (Ile)	94.2	107.7	10.67
9	Glutaminsäure (Glu)	93.0	94.8	9.52
10	Hefeprotein*	87.9	48.6	5.49

n.b. nicht bestimmt

2: Ammoniumchlorid

3: Kaliumnitrat

4:  $^{15}\text{NH}_4$  &  $^{15}\text{NO}_3$

\* nach Wutzke et al. (1983)

Als Ammonium (Nr. 2) wurde Ammoniumchlorid und als Nitrat (Nr. 3) Kaliumnitrat verwendet. Zu 150 mg Biokohle wurden von jeder Stickstoffquelle jeweils 1,5 ml einer 30 mM  $^{15}\text{N}$ -Lösung zugegeben, was einer Menge von 0.675 mg  $^{15}\text{N}$  pro Reaktionsgefäß entspricht.

## Probenahme, Analysen und Berechnungen

Die Probenahmen erfolgten am 2., 15. und 30. Tag nach Versuchsbeginn. Dazu wurden die Reaktionsgefäße zunächst geschüttelt und die Suspension (Biokohle -  $^{15}\text{N}$ -Lösungsgemisch) quantitativ in einen im Trichter befindlichen Filter (MN 616, Durchmesser: 11 cm, Dicke: 0,2 mm, Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Deutschland) überführt. Die Biokohlen der Variante "mit" Waschen wurden nach der Filtration 2 Mal mit jeweils 1.5 ml Wasser (aufbereitet wie für die Kontrolle)

gewaschen. Nach dem Durchlauf der wässrigen Phase wurden die Filter mit der Biokohle bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach der Trocknung wurden jeweils 4.0 mg der Biokohlen auf Zinnscheiben (28 mm, IVA Analysetechnik e. K., Meerbusch, Deutschland) mithilfe einer Feinwaage (Sartorius, Deutschland) eingewogen.  $^{15}\text{N}$  und  $\text{N}$  wurden dann mit einem Isotopenverhältnis-Massenspektrometer (Sercon 20-20, UK) gemessen.  $^{15}\text{N}$  wurde bei den Ergebnissen angegeben auf Überschussbasis, d.h. von der gemessenen  $^{15}\text{N}$ -Markierung wurde die natürliche Häufigkeit von 0.366 Atom-%  $^{15}\text{N}$  abgezogen und die entsprechenden  $^{15}\text{N}$ -Gehalte berechnet (Faust et al., 1981).

$$^{15}\text{N}: \text{Atom-\%} - 0.366 = \text{Atom-\% } ^{15}\text{N} \text{ Überschuss}$$

$$m(^{15}\text{N}) \text{ Überschuss} = \frac{15 * \text{Atom-\% Überschuss} * m\text{N}}{1400 + \text{Atom-\% Überschuss}}$$

mN: Masse Stickstoff

m ( $^{15}\text{N}$ ): Masse  $^{15}\text{N}$

### Statistische Analyse

Für die statistische Analyse wurde vom  $^{15}\text{N}$ -Gehalt jeweils der Gehalt der Kontrolle der Termine und Biokohlen (abgekochtes destilliertes Wasser) abgezogen. Der korrigierte Gehalt wird weiterhin als  $^{15}\text{N}$ -Gehalt bezeichnet. Der Stickstoffgehalt sowie der Gehalt an  $^{15}\text{N}$  wurden mit der einfaktoriellen ANOVA gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ) zur Analyse der signifikanten Unterschiede zwischen den N-Quellen und Terminen für die jeweilige Biokohle (Pyro oder HTC) getestet (SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows). Daten wurden als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung (SD) berechnet. Zum Vergleich der Mittelwerte der organischen und anorganischen Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen wurde der Student's *t*-Test verwendet.

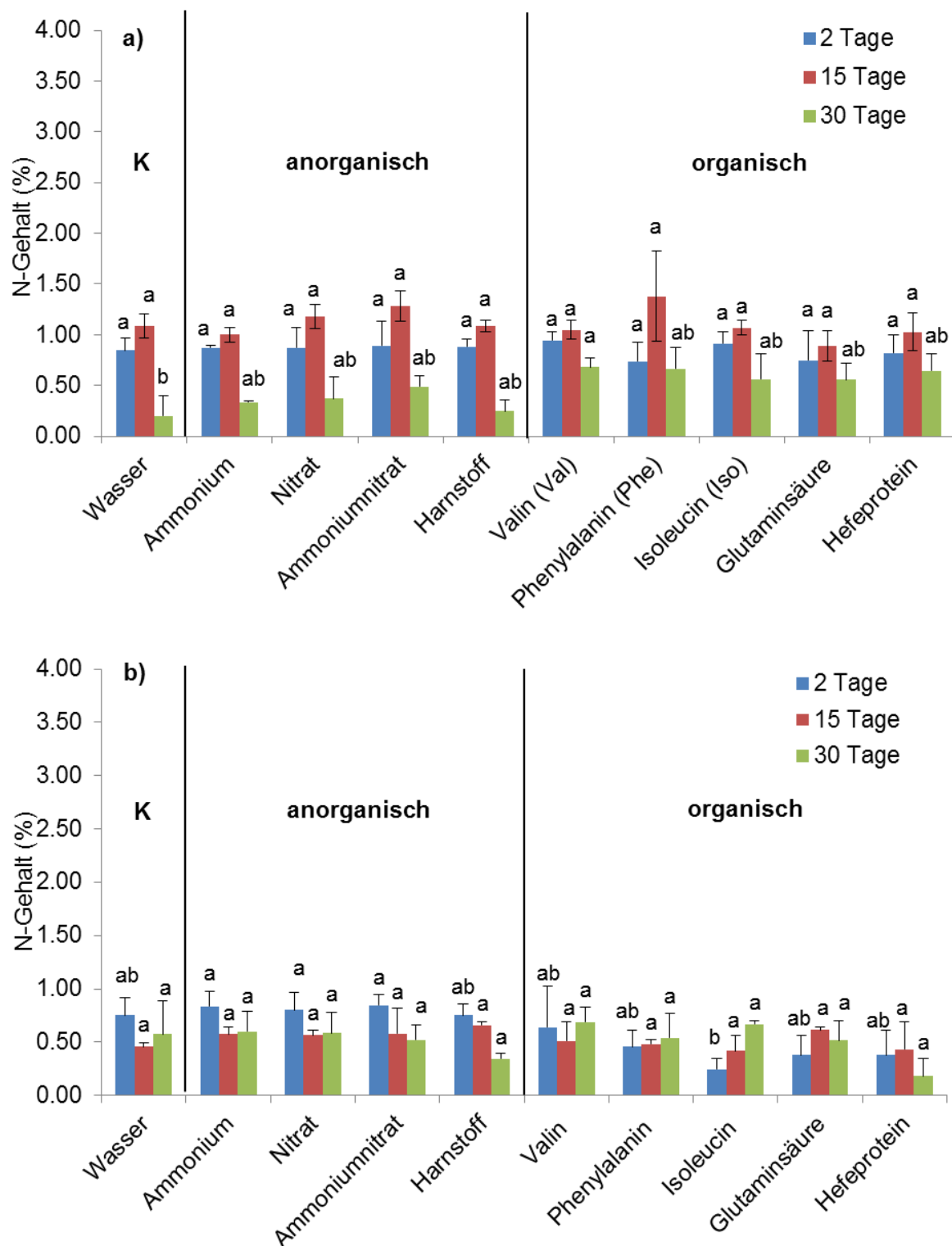
### 5.3 Ergebnisse

N-Gehalte der Biokohlen bei unterschiedlichen Stickstoffquellen zu den Probenahmeterminen

Der Stickstoffgehalt der Pyro-Biokohle lag nach 2 Tagen in einem Bereich zwischen 0.74-0.94 % (Mittelwert: 0.85 %) wobei die verschiedenen Stickstoffquellen keinen Einfluss auf den N-Gehalt hatten, da kein Unterschied zur Kontrolle bestand (Abb. 15a). Nach 15 Tagen, in denen die Kohlen wässrigem Medium ausgesetzt waren, und anschließend getrocknet wurden, ergaben sich N-Gehalte zwischen 0.89 und 1.38 % (Mittelwert: 1.10 %), die ebenso wie nach 2 Tagen, keine Unterschiede zwischen den Behandlungen zeigten.

Nach einer Behandlungszeit von 30 Tagen wies die Kontrolle einen N-Gehalt von nur noch 0.20 % auf, der sich deutlich von den nach 2 und 15 Tagen bestimmten Gehalten mit 0.84 und 1.09 % N unterschied. Der N-Gehalt der Pyro-Biokohle lag am 30. Tag nach Zusatz der N-Quellen zwischen 0.24 und 0.68 % N. Pyro-Biokohle, die mit anorganischen Verbindungen behandelt wurde, hatte einen N-Gehalt zwischen 0.24 und 0.49 % (Mittelwert: 0.36 %). Bei der Behandlung mit den organischen Verbindungen lag der N-Gehalt zwischen 0.55 und 0.68 % N (Mittelwert: 0.62 %), und war damit nur tendenziell größer (ns, Student's *t*-Test).

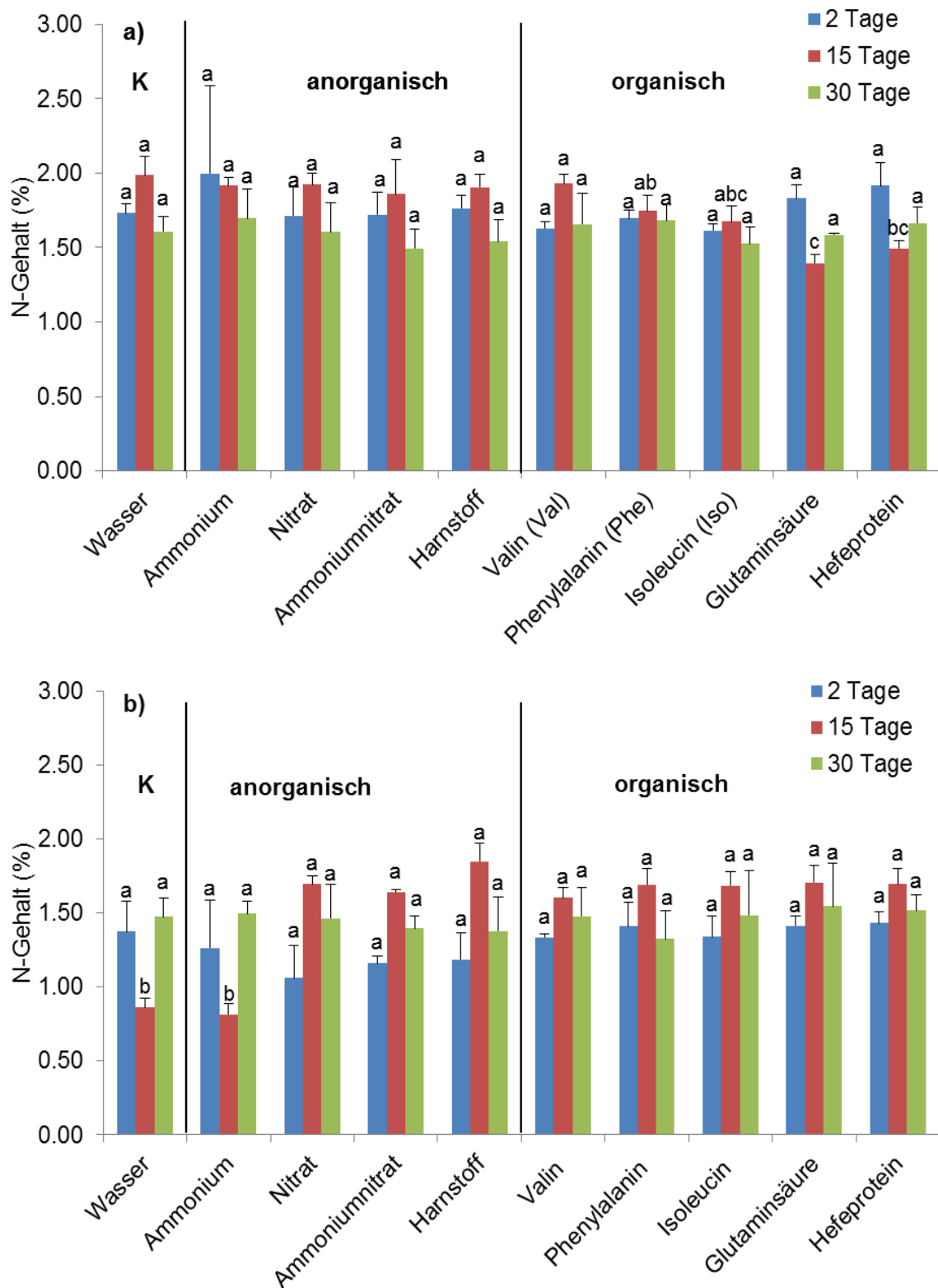
Das Waschen der Pyro-Biokohle hatte am 2. Tag (0.84 vs 0.75 % N) keine Wirkung auf den N-Gehalt der Kontrolle. Am 15. Tag nahm der N-Gehalt durch das Waschen um mehr als 50 % ab (1.09 vs 0.46 % N) und am 30. Tag um mehr als 50 % zu (0.19 vs 0.57 % N) (Abb. 15a+b). Der N-Gehalt der Pyro-Biokohle bei Zugabe von anorganischen N-Verbindungen war nach zwei Tagen ebenfalls unverändert (0.88 vs 0.81 % N), jedoch bei dem Zusatz von den organischen Verbindungen deutlich erniedrigt (0.83 vs 0.43 % N). Das Waschen (Abb. 15b) führte nach 15-tägiger Behandlung sowohl bei den anorganischen als auch den organischen Verbindungen zu einer signifikanten Abnahme des N-Gehaltes (1.13 vs 0.59; 1.09 vs 0.51 % N). Insgesamt lag der N-Gehalt der Pyro-Biokohle nach 30 Tagen bei Zugabe der anorganischen und organischen N-Verbindungen bei 0.36 und 0.61 % N. Waschen führte bei der Probenahme nach 30 Tagen bei dem Zusatz der anorganischen N-Verbindungen zu einem signifikanten Anstieg auf 0.51 % N (Abb. 15a+b).



**Abbildung 15:** Stickstoffgehalte (%) der Pyro-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte  $\pm$  SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Die HTC-Biokohle (Abb. 16a) hatte nach 2 Tagen durchschnittlich einen N-Gehalt von 1.76 % N (Bereich zwischen 1.61 und 2.00 % N), der doppelt so hoch war wie bei der Pyro-Biokohle, und sich zwischen der Kontrolle und den Behandlungen mit den unterschiedlichen N-Quellen nicht unterschied.

Nach 15 Tagen wurden bei der HTC-Biokohle bei Zusatz der anorganischen Verbindungen (1.86-1.92 % N), und außerdem bei Valin, signifikant höhere N-Gehalte als bei Zusatz des Hefeproteins (1.49 % N) und Glutaminsäure (1.40 % N) bestimmt. Diese Unterschiede bestanden jedoch nur vorübergehend, da sich nach 30 Tagen keine Unterschiede im N-Gehalt zeigten. Die N-Gehalte variierten außerdem nach 30 Tagen in einem engen Bereich zwischen 1.52 und 1.70 % (Mittelwert: 1.61 %). Der N-Gehalt der Kontrolle war nach 15 Tagen mit 1.99 % ebenfalls deutlich höher als nach 2 und 30 Tagen mit 1.73 bzw. 1.61 %. Nach dem Waschen enthielt die Kontrolle bei den Probenahmen nach 2 und 15 Tagen deutlich weniger N (1.73 vs 1.37 und 1.99 vs 0.86 % N), war dann aber nach 30 Tagen nicht unterschiedlich (1.61 vs 1.47 % N). Auffällig war bei der Kontrolle der höchste N-Gehalt nach 15 Tagen (1.99 % N), der durch das Waschen zu dem niedrigsten Wert (0.86 % N) führte (Abb. 16a+b).



**Abbildung 16:** Stickstoffgehalte (%) der HTC-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte  $\pm$  SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Waschen der HTC-Biokohle führte an allen Terminen zu einer signifikanten Abnahme des N-Gehaltes bei Zusatz der anorganischen N-Quellen (2 Tage: 1.80 vs 1.17; 15 Tage: 1.90 vs 1.50; 30 Tage: 1.58 vs 1.43 % N). Im Vergleich dazu kam es bei den organischen N-Quellen durch das Waschen nur nach 2-tägiger Inkubation zu einer Abnahme des N-Gehaltes von 1.80 auf 1.17 % N. Die N-Gehalte bei Anwendung organischer N-Quellen blieben nach 15 und 30 Tagen durch das Waschen unverändert (1.69 vs 1.67; 1.61 vs 1.46 % N).

<sup>15</sup>N-Gehalte der Biokohlen bei unterschiedlichen Stickstoffquellen nach 2, 15 und 30 Tagen

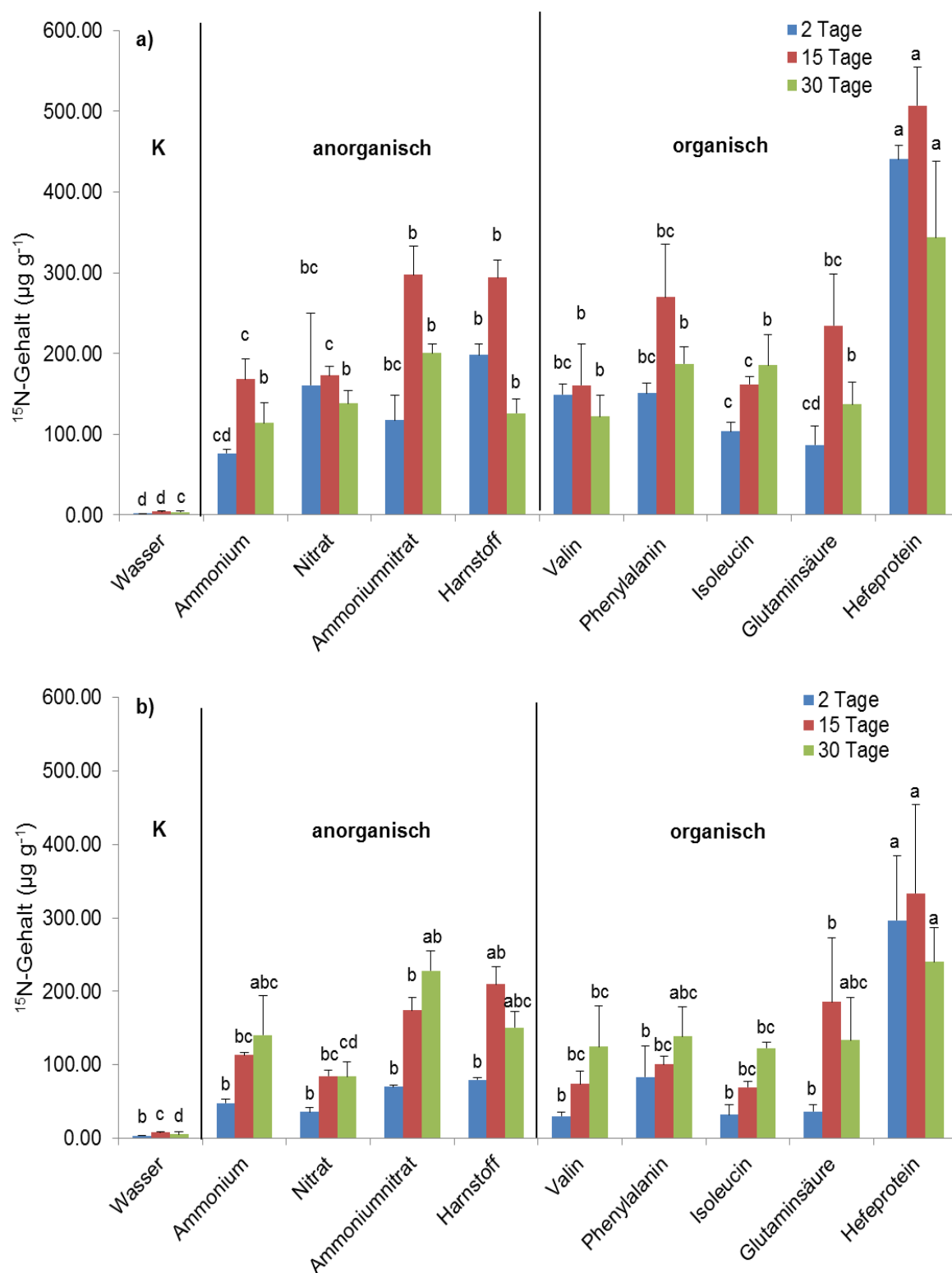
Die Pyro-Biokohle der Kontrolle enthielt im Durchschnitt der drei Termine 2, 15 und 30 Tage  $3.42 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$ , der mit  $5.74 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  durch das Waschen unverändert blieb. Der <sup>15</sup>N-Gehalt der HTC-Biokohle war um den Faktor 7 mit  $22.9 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  höher und war mit  $23.3 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  durch das Waschen ebenfalls unbeeinflusst. Um ausschließlich den Effekt der unterschiedlichen <sup>15</sup>N-Stickstoffquellen auf die Biokohlen zu bestimmen, wurden die jeweils nach 2, 15 und 30 Tagen bestimmten Mengen der natürlichen <sup>15</sup>N-Gehalte von den <sup>15</sup>N-Gehalten der verschiedenen N-Quellen subtrahiert (Abb. 17 und 18).

Die <sup>15</sup>N-Gehalte der Pyro-Biokohle lagen nach 2 Tagen in einem Bereich zwischen  $76 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und  $441 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Hefeprotein). Der Zusatz des Hefeproteins bewirkte deutlich höhere Gehalte im Vergleich zu den anorganischen und organischen N-Quellen. Diese Aussage für das Hefeprotein trifft ebenso auf die anderen beiden Termine (15 und 30 Tage) zu. <sup>15</sup>N-Harnstoff war nach 2 Tagen mit  $198 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  mehr als doppelt so viel wie Ammonium ( $76 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$ ) und Glutaminsäure ( $86 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$ ) in der Pyro-Biokohle nachweisbar. Nitrat, Ammoniumnitrat, Phenylalanin, Valin und Isoleucin befanden sich jeweils in den homogenen Gruppen von Harnstoff bzw. Ammonium und Glutaminsäure (Abb. 17a). Nach 15 Tagen lagen die <sup>15</sup>N-Gehalte in einem Bereich zwischen  $161 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Valin) und  $507 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Hefeprotein). Bei Harnstoff ( $294 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$ ) und Ammoniumnitrat ( $297 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$ ) war eine Zunahme um den Faktor 1.5 bzw. 2.5 im Vergleich zur Probenahme nach 2 Tagen zu verzeichnen. Beide anorganische N-Verbindungen erreichten deutlich höhere <sup>15</sup>N-Gehalte als Nitrat und Ammonium sowie Isoleucin und Valin.

Zur Probenahme nach 30 Tagen waren die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte niedriger als nach 15 Tagen und lagen in einem Bereich zwischen  $114 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und  $344 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Hefeprotein). Bis auf den deutlich höheren  $^{15}\text{N}$ -Gehalt bei dem Hefeprotein, waren zwischen anorganischen und den anderen organischen N-Quellen keine der Unterschiede, wie sie nach 2 und 15 Tagen sichtbar waren, nachweisbar.

Das Waschen der Pyro-Biokohle führte, unabhängig von der N-Quelle, nach 2-tägiger Behandlung zur Abnahme der  $^{15}\text{N}$ -Gehalte, die zwischen  $30 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Valin) und  $83 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Phenylalanin) lagen, und mit  $296 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  deutlich höher beim Hefeprotein war (Abb.17b). Nach 15-tägiger Behandlung wurden nach dem Waschen höhere  $^{15}\text{N}$ -Gehalte als nach 2 Tagen bestimmt. Die Gehalte lagen zwischen  $69 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Isoleucin) und  $333 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Hefeprotein). Mit Ausnahme des Hefeproteins waren nach 2 und 15 Tagen keine Unterschiede bei der Sorption zwischen anorganischen und organischen N-Quellen nach dem Waschen erkennbar. Die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte nach dem Waschen nach 30-tägiger Behandlung, die in einem Bereich zwischen  $84 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Nitrat) und  $239 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Hefeprotein) lagen, variierten zwischen Nitrat, Ammoniumnitrat und dem Hefeprotein besonders deutlich (Abb.17b).

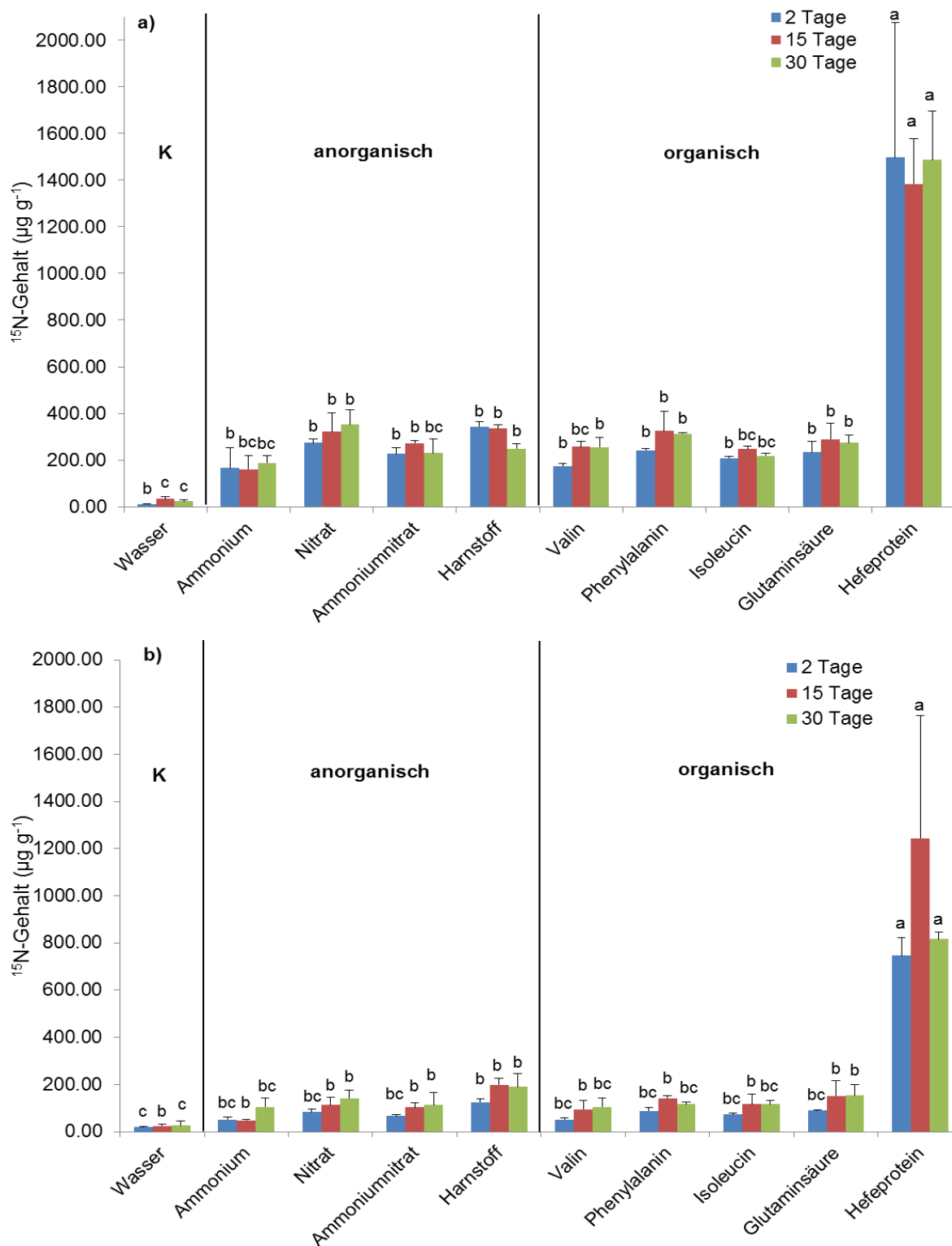




**Abbildung 17:**  $^{15}\text{N}$ -Gehalte ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) der Pyro-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte  $\pm$  SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Die HTC-Biokohle hatte durch Anwendung des Hefeproteins nach 2, 15 und 30 Tagen die höchsten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte mit 1496, 1383 und 1487  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$ . Damit bestanden nicht nur deutliche Unterschiede zu den anderen N-Quellen, sondern auch zur Sorption an die Pyro-Biokohle, die nur etwa ein Drittel bis ein Viertel der Menge aufwies (Abb. 18a). Nach 2, 15 und 30 Tagen waren zwischen anorganischen und organischen N-Quellen (Ausnahme Hefeprotein) keine Unterschiede festzustellen. Die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte variierten dabei zwischen 165  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und 344  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Harnstoff), 161  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und 334  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Harnstoff) bzw. 187  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und 352  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Nitrat).

Nach Behandlung mit dem Hefeprotein und nach dem Waschen der HTC-Biokohle wurden nach 2, 15 und 30 Tagen  $^{15}\text{N}$ -Gehalte mit 746, 1245 und 817  $\mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  bestimmt, wodurch 50, 90 bzw. 55 % im Vergleich zur Variante ohne Waschen nachweisbar waren, die sich außerdem am jeweiligen Termin signifikant von den anderen N-Quellen unterschieden (Abb.18b).



**Abbildung 18:**  $^{15}\text{N}$ -Gehalte ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) der HTC-Biokohle in den unterschiedlichen Behandlungen „ohne Waschen“ (a) und „mit Waschen“ (b). Mittelwerte  $\pm$  SD; Signifikante Unterschiede zwischen den Stickstoffquellen zu den jeweiligen Terminen sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Nach 2, 15 und 30 Tagen waren nach dem Waschen zwischen anorganischen und organischen N-Quellen (Ausnahme Hefeprotein) jeweils keine Unterschiede festzustellen. Die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte lagen dabei zwischen  $51 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und  $124 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Harnstoff),  $47 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und  $198 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Harnstoff) bzw.  $104 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Ammonium) und  $190 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  (Harnstoff) (Abb. 18b).

## 5.4 Diskussion

### Pyro-Biokohle versus HTC-Biokohle

Bisher sind in der Literatur keine Daten von  $^{15}\text{N}$ -Gehalten von Biokohlen auf der Ebene der natürlichen Häufigkeit verfügbar. Die Ergebnisse der *in vitro* Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von  $^{15}\text{N}$  markierten anorganischen und organischen Verbindungen und deren Reversibilität durch Waschen und in Abhängigkeit von der Zeit liefern daher einen Beitrag zur Beschreibung von Eigenschaften der Pyro-Biokohle und HTC-Biokohle.

Prozessbedingt kommt es zu deutlichen Anreicherungen des natürlichen  $^{15}\text{N}$  Pools, da sich die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der Kontrolle zwischen Pyro-Biokohle und HTC-Biokohle, trotz gleichen Ausgangsmaterials, markant unterschieden, über die Zeit unverändert blieben und auch durch Waschen nicht beeinflusst wurden. In biologischen Systemen wird stets das leichte Isotop  $^{14}\text{N}$  im Rahmen von (enzymatischen) Syntheseprozessen bevorzugt, und da  $^{15}\text{N}$  außerdem langsamer ist (z.B. bei der Diffusion), kommt es im Substrat zu einer Anreicherung mit dem schweren Isotop  $^{15}\text{N}$ . Bemerkenswert ist hierbei eine Erhöhung der natürlichen Anreicherung mit  $^{15}\text{N}$ , die besonders durch die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) gefördert wurde.

Die Stickstoffgehalte waren in der Pyro-Biokohle bei allen Behandlungen zur ersten Probenahme nach 2 Tagen (ohne Waschen) deutlich geringer als die Stickstoffgehalte in allen Varianten der HTC-Biokohle zur vergleichbaren Probenahme. Das ist zum einen auf den höheren Ausgangsgehalt von Stickstoff (Tab. 1) der HTC-Biokohle zurückzuführen. Zum anderen wäre eine mögliche Erklärung, dass die Löslichkeit des in der Biokohle vorhandenen Stickstoffs bei der Pyro-Biokohle höher war. Zum 15. Tag stieg der N-Gehalt der Pyro-Biokohlen in den jeweiligen Varianten an und nahm zum 30. Tag wieder ab. Dieser Verlauf zeigte sich bei den Varianten der HTC-Biokohle weniger deutlich.

Die HTC-Biokohle hat mit  $8.27 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  eine größere Oberfläche als die Pyro-Biokohle mit  $1.69 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ . Die HTC-Biokohle bindet in einer *in vitro* Suspension  $^{15}\text{N}$  zu einem in größeren Mengen und zweitens fester als die Pyro-Biokohle, bei der die  $^{15}\text{N}$ -Sorption vorübergehend stärker war, dann aber wieder abnahm. Trotz des höheren N-Gehaltes kann es durch die HTC-Biokohle zu einer Wachstumshemmung in Kombination mit niedriger Stickstoffgabe kommen (Gajić und Koch, 2012). Damit belegen und quantifizieren diese  $^{15}\text{N}$ -Untersuchungen die Annahme, dass Stickstoff unterschiedlicher Herkunft in der HTC-Biokohle fester gebunden und damit nicht pflanzenverfügbar ist. Außerdem kann hier unterstützend angeführt werden, dass sich die Wiederfindungsrate des  $^{15}\text{N}$  ( $4500 \mu\text{g } ^{15}\text{N g}^{-1}$  Biokohle = 100 Prozent) bei allen Varianten (mit Ausnahme von Phenylalanin) der HTC-Biokohle mit Waschen zwischen den Terminen nicht unterschied.

Nitrat wurde von beiden Biokohlen sorbiert und durch das Waschen zum Teil wieder freigesetzt. Nach Zhang et al. (2012) haben Biokohlen das Potential Nährstoffe von Lösungen zu sorbieren und damit die Auswaschung von Nährstoffen zu mindern. In der vorliegenden Studie wurde die Sorption beider Biokohlen untersucht. Vor allem bei der Pyro-Biokohle war die Sorption reversibel. Somit kann es zu einer "catch and release" Reaktion von Nährstoffen an Biokohlen kommen.

#### Anorganische versus organische Stickstoffquellen

Der Unterschied der Sorption anorganischer und organischer Stickstoffquellen wurde auf dem ersten Blick vor allem bei dem hohen  $^{15}\text{N}$ -Gehalt des Hefeproteins bei beiden Biokohlen deutlich. Trotz der hohen Gehalte an  $^{15}\text{N}$  in den Biokohlen wich der Gesamtstickstoffgehalt (%) der Kombination Biokohle-Hefeprotein nicht signifikant von den anderen Stickstoffquellen ab, was einerseits bedeutet, dass eine einfache N-Bestimmung zur Quantifizierung nicht ausreichend ist, und andererseits die Sensitivität der Anwendung der  $^{15}\text{N}$ -Tracertechnik bestätigt. Bei Betrachtung der Ergebnisse bei Zugabe des Hefeproteins in Form einer Lösung ( $30 \text{ mM } ^{15}\text{N}$ ) muss bedacht werden, dass es im Verlauf der Zeit zu Proteolyse kam, was auch organoleptisch besonders nach 30 Tagen wahrnehmbar war.

Erkennbar ist, dass die anorganischen und organischen (ohne Hefeprotein) Stickstoffquellen in ähnlichem Maße an der HTC-Biokohle gebunden wurden und durch das Waschen auch vergleichbar viel Stickstoff verloren ging. Im Vergleich dazu zeigte die Pyro-Biokohle differenzierte Wirkungen. Zum ersten Termin nahmen die

$^{15}\text{N}$ -Gehalte der Pyro-Biokohle in organischen und anorganischen Stickstoffquellen durch das Waschen in ähnlichem Maße ab. Die Stickstoffgehalte (%) nahmen in den organischen Stickstoffquellen zum ersten Termin vor allem bei Isoleucin durch das Waschen deutlicher ab als die anorganischen Stickstoffquellen. Isoleucin ist eine aliphatische Aminosäure mit lipophiler Seitenkette, wodurch ihr Sorptionsverhalten an Biokohlen beeinträchtigt sein kann, und Isoleucin am ersten Termin (2. Tag) dadurch leichter ausgewaschen wurde.

Beim Vergleich von den  $^{15}\text{N}$ -Gehalten der Pyro-Biokohle bei den organischen Stickstoffquellen fällt auf, dass nach dem Waschen ähnliche Gehalte zwischen den verschiedenen Aminosäuren gemessen wurden und alle in vergleichbarem Maß abnahmen. Die anorganischen Stickstoffquellen hingegen unterschieden sich in dem  $^{15}\text{N}$ -Gehalt der Pyro-Biokohle am 30. Tag zum Teil deutlicher, nahmen aber durch das Waschen (Ausnahme: Nitrat) im Vergleich zu den Gehalten ohne Waschen am 30. Tag nicht mehr ab. Es scheint sich bei den anorganischen Stickstoffquellen (Ausnahme: Nitrat) in Abhängigkeit von der Zeit ein Gleichgewicht zwischen an der Biokohle sorbiertem und in der Suspension gelöstem  $^{15}\text{N}$  einzustellen, das möglicherweise bei den organischen Stickstoffquellen am 30. Tag noch nicht erreicht ist oder auch nicht erreicht werden kann.

#### Einfluss des Waschens auf N- und $^{15}\text{N}$ -Gehalte

Das Waschen wurde mit in die Methodik aufgenommen, da untersucht werden sollte, wie fest unterschiedliche Stickstoffquellen an den Biokohlen sorbieren. Dazu wurden die Suspensionen quantitativ in Filter überführt und die Biokohlen 2 Mal mit jeweils 1.5 ml Wasser versetzt. Die Wassermenge einer Waschung entspricht bei beiden Biokohlen der 1.7 fachen Menge der eingewogenen Biokohle (150 mg) und ist in Menge und Häufigkeit ausreichend, um Auswascheffekte an den Biokohlen zu bestimmen.

Durch das Waschen nahmen die Stickstoffgehalte beider Biokohlen in allen Varianten unterschiedlich stark ab. Hierbei handelt es sich um Stickstoff, der über die Zeit aus der Biokohle in die Suspension freigesetzt wurde, aber auch um den in Lösung zugegebenen Stickstoff in Form von N bzw.  $^{15}\text{N}$ . Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass es keinen festen Verlauf zwischen dem 2. und 30. Tag gab. Allerdings wird deutlich, dass die Auswaschverluste von Stickstoff am 30. Tag nicht mehr so hoch waren wie nach 2 und 15 Tagen. Der potentiell aus der Biokohle in

Lösung gehende Stickstoff nahm daher bis zu diesem Termin ab, bzw. die zugegebenen  $^{15}\text{N}$ -Quellen anorganischer und organischer Herkunft wurden fester sorbiert.

Bei der Beladung der Biokohlen mit Nährstoffen durch Kompost oder Gärrest (Alburquerque et al., 2013; Bruun et al., 2012; Joseph et al., 2013; Schulz und Glaser, 2012) würde bei einer zunehmend stärkeren Bindung des Stickstoffs durch die HTC-Biokohle die Verfügbarkeit dieses Nährstoffs, stärker als bei der Pyro-Biokohle, abnehmen. Die Pyro-Biokohle hingegen bindet Stickstoff innerhalb von 15 Tagen, setzt ihn allerdings in den darauffolgenden 15 Tagen unter *in vitro* Bedingungen auch wieder frei. Dadurch wird die Sorption reversibler als bei der HTC-Biokohle, und der Stickstoff aus einer mit Gärrest fermentierten Pyro-Biokohle wird besser löslich und damit für das Pflanzenwachstum verfügbar.

## 5.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der *in vitro* Anwendung der Isotopenverdünnungstechnik mit  $^{15}\text{N}$  zeigte, dass diese Methodik sehr gut geeignet war, um die Sorption an Biokohlen von vier verschiedenen und für die Düngung repräsentativen anorganischen Stickstoffquellen wie Ammonium, Nitrat, Ammoniumnitrat und Harnstoff sowie fünf verschiedenen organischen Stickstoffquellen (vier Aminosäuren und ein Hefeprotein) über einen Zeitraum bis zu 30 Tagen zu quantifizieren. Weiterhin konnte gezeigt werden, welchen Effekt das Waschen auf die Stickstoffgehalte und  $^{15}\text{N}$ -Gehalte der Pyro-Biokohle und HTC-Biokohle hatte. Die Prozessführung bei der Herstellung von Biokohlen hat einen deutlichen Einfluss auf den natürlichen  $^{15}\text{N}$ -Gehalt, der bei der Pyro-Biokohle deutlich geringer war als bei der HTC-Biokohle und bei beiden Biokohlen durch Waschen unverändert blieb. Je nach Herstellungsprozess sorbierten die Biokohlen Stickstoff unterschiedlich stark in Abhängigkeit von der Zeit. Von den anorganischen N-Quellen fanden sich hauptsächlich bei Ammonium die niedrigsten und bei Harnstoff die höchsten  $^{15}\text{N}$ -Gehalte. Bei den  $^{15}\text{N}$ -Aminosäuren ergab sich zu den drei Terminen ein differenzierteres Bild. Hierbei spielen die chemischen Eigenschaften eine besondere Rolle, wie z.B. ob es sich um aliphatische (Valin, Isoleucin), aromatische (Phenylalanin) oder saure Aminosäuren handelt. Hochmolekulare Proteine, wie am Beispiel des  $^{15}\text{N}$ -Hefeproteins gezeigt werden konnte, werden sehr stark von Biokohlen, besonders von HTC-Biokohle, sorbiert. Auswaschverluste waren auch hier nachweisbar. Allerdings waren die  $^{15}\text{N}$ -Gehalte

dennoch stets signifikant höher als bei allen anderen untersuchten N-Quellen. Die HTC-Biokohle hatte eine größere Oberfläche als die Pyro-Biokohle. Die Oberfläche kann damit als ein Grund für die stärkere Sorption von N-Quellen an der HTC-Biokohle, der zwischen den Terminen kaum schwankte, angenommen werden. Dennoch verminderte sich der  $^{15}\text{N}$ -Gehalt durch das Waschen der HTC-Biokohle nach 2, 15 und 30 Tagen. Die pyrolysierte Biokohle hingegen zeigte am 30. Tag kaum Unterschiede zwischen den  $^{15}\text{N}$ -Gehalten ohne und mit Waschen. So kann es bei einer Anwendung der Biokohlen im Feld zu einer vorübergehenden, aber reversiblen Bindung von Nährstoffen kommen. Des Weiteren könnten Nitratauswaschungen (zeitweilig) vermindert werden, wozu allerdings weitergehende Untersuchungen z.B. unter kontrollierten Bedingungen und / oder im Feldversuch erforderlich sind.



## **6 Kapitel 5: Einfluss von Biokohlen auf die Bodenfauna am Beispiel von Collembolen**

### **6.1 Einleitung**

Neben den Effekten der Biokohlen auf den Boden und die Pflanzen wurden Wechselwirkungen von Biokohlen und mikrobiellen Gemeinschaften intensiv untersucht, wobei die meisten Studien positive Effekte fanden (Anderson et al., 2011; Bargmann et al., 2014a; LeCroy et al., 2013; Quilliam et al., 2013). Im Gegensatz dazu fanden Bodentiere weniger Aufmerksamkeit und Forschungsarbeiten waren hauptsächlich auf Regenwürmer fokussiert (Noguera et al., 2012; Noguera et al., 2010; Salem et al., 2013b). Bodenmikroarthropoden wie Collembolen wurden deutlich weniger beachtet (Domene et al., 2014; Lehmann et al., 2011), obwohl sie sehr häufig in der Rhizosphäre von Pflanzen (Bardgett et al., 1993) auftreten.

Collembolen sind die häufigsten Mikroarthropoden im Boden, mit Populationsdichten in temperiertem Grasland und Waldböden von durchschnittlich 40.000 Individuen m<sup>-2</sup> (Hopkin, 1997). Collembolen als Pilzfresser spielen eine wichtige Rolle in der Regulierung des pilzbasierten Nahrungsnetzes im Boden (Chen et al., 1995; Klironomos und Kendrick, 1995; Visser et al., 1987). Die Fraßaktivitäten der Collembolen („grazing“) fördern Zersetzungsprozesse und die Mineralisierung der organischen Substanz, mit positiven Effekten auf die Pflanzenentwicklung (Scheu et al., 1999). Die Aktivität der Collembolen beeinflusst Wurzelwachstum und Morphologie (Cole et al., 2004a; Endlweber und Scheu, 2006; Theenhaus et al., 1999) sowie die Funktion der arbuskulären Mykorrhiza-Symbiose (Boerner und Harris, 1991; Kaiser und Lussenhop, 1991; Ngosong et al., 2014). Die damit verbundenen Auswirkungen auf die Pflanzen dürften einen wichtigen Faktor bei den Wechselwirkungen von Biokohlen in Anbausystemen darstellen.

Allerdings gibt es bislang nur wenige Studien, die sich mit Biokohlen und Collembolen befasst haben (Domene et al., 2014; Marks et al., 2014; Salem et al., 2013a). Eine wichtige Erkenntnis ist, dass Collembolen Biokohlen konsumieren können und damit im Abbau und in der Verteilung von Biokohlen im Boden eine wichtige Rolle spielen könnten. In der Literatur gibt es bislang keine Studie, die sich mit der Populationsentwicklung der Collembolen im Gefäßversuch bei der Anwendung unterschiedlicher Biokohlen sowie fermentierter HTC-Biokohle

beschäftigte. Des Weiteren gibt es keine Erkenntnisse zu den Effekten der Anwendung von unterschiedlichen Biokohlen im Feldversuch auf die Bodenmesofauna und Artenstruktur der Collembolen. Bekannt ist jedoch, dass die Ausbringung organischer Dünger zu einer erhöhten Dichte und Diversität von Collembolenpopulationen führt (Leroy et al., 2007).

#### Laborstudie

Die vorliegende Studie beschäftigte sich mit unterschiedlich produzierten Biokohlen und deren Auswirkungen auf die Collembolen und auf die Biomasseproduktion von *Triticum aestivum* L., hier Sommerweizen. Für die Gefäßversuche wurden die Pflanzen in ein Gewächshaus gestellt. Diese wuchsen mit oder ohne Biokohleeinsatz und wurden mit der Collembolenart *Protaphorura fimata* inokuliert. Für *P. fimata* ist bekannt, dass sie Pflanzenwurzeln konsumiert (Endlweber und Scheu, 2006; Ngosong et al., 2014). Drei Versuche wurden durchgeführt um die Auswirkungen: (i) verschiedener Biokohlen (Pyro-Biokohle, HTC-Biokohle, Pyreg-Biokohle) und der fermentierten HTC-Biokohle auf die Dichte von *P. fimata* und (ii) unterschiedlicher Mengen fermentierter HTC-Biokohle auf die Abundanz von *P. fimata* zu untersuchen sowie (iii) die Wechselwirkungen zwischen Pyro-Biokohle und Collembolen auf Spross- und Wurzelwachstum sowie Wurzelmorphologie von Sommerweizen zu quantifizieren. Es wurde vermutet, dass Biokohlen, abhängig von Ausgangsmaterial und Produktionsprozess, differenzierten Einfluss auf die Entwicklung von *P. fimata* haben, mit positiven Auswirkungen von fermentierten HTC-Biokohle im Vergleich zu den anderen Biokohlen. Zusätzlich wurde eine Förderung des Pflanzenwachstums durch die Interaktionen von Biokohlen und Collembolen erwartet, da beide die mikrobielle Aktivität fördern können.

#### Feldstudien

Im Feldversuch (Abschnitt 2.2) wurden Proben zu unterschiedlichen Zeitpunkten in ausgewählten Parzellen genommen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Biokohlen auf die Bodenfauna im zeitlichen Verlauf zu untersuchen. Die Probenahmen erfolgten an drei Terminen mit unterschiedlichem Entwicklungsstand der Ackerfrucht Winterweizen: März – Frühjahr (beginnendes Wachstum), April – spätes Frühjahr (Wachstumsphase mit erhöhter Wurzelexsudation), Oktober – Herbst (nach der Ernte). Die Termine wurden so ausgewählt, dass Probenahmen

nicht direkt nach einer Bodenbearbeitung, Düngung oder Pflanzenschutzmittelanwendung erfolgten. Es wurden alle in dem Bodenkern (0-10 cm) extrahierten Tiere (Makrofauna, Mesofauna) bis zur Ordnung oder Familie und die Collembolen bis zur Art bestimmt. Angenommen wurde, dass die Ausbringung der Biokohlen einen negativen Einfluss auf die untersuchte Bodenfauna hat. Außerdem wurde vermutet, dass die unterschiedlichen Biokohlen die Bodenfauna differenziert beeinflussen und zudem Auswirkungen auf die Populationsdynamik haben.

## 6.2 Material und Methoden

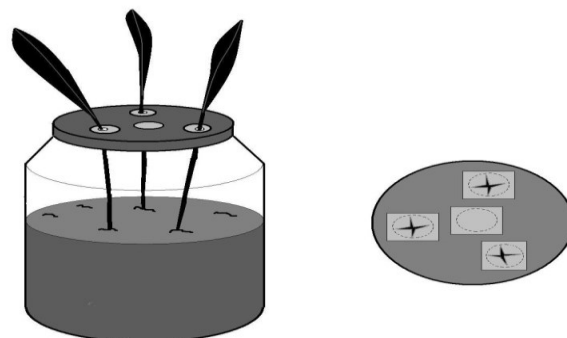
### 6.2.1 Gefäßversuch

#### Biokohle und Boden

Es wurden die HTC-Biokohle, Pyro-Biokohle, Pyreg-Biokohle und HTC\_ferm. verwendet (Abschnitt 2.2). Als Boden wurde lehmiger Sandboden von dem Versuchsfeld in der Nähe von Berge, Brandenburg verwendet (Abschnitt 3.2).

#### Versuchsaufbau

Für alle drei Versuche wurde der Boden defauniert (drei Perioden von 5 Tagen bei -21 °C gefolgt von Auftauen), in Glasgefäße (Volumen: 2650 ml) gefüllt und auf 60 % Wasserhaltekapazität eingestellt (Abb. 19). Drei vorgekeimte (5 Tage alt) Sommerweizenpflanzen (*Triticum aestivum* L., cv. Chamsin, KWS, Deutschland) wurden pro Gefäß eingesetzt. In die Deckel wurden vier Löcher gestanzt, drei für das Pflanzenwachstum (außen) und ein Loch (Mitte) für Bewässerung und Einsetzen der Collembolen. Die Löcher wurden fest mit Nylongaze (Maschenweite: 1 µm) verschlossen (Abb. 19).



**Abbildung 19:** Schematische Darstellung der verwendeten Glasgefäße.

Nach zweiwöchigem Wachstum der Sommerweizenpflanzen wurden 150 Collembolen der euedaphischen Art *Protaphorura fimata* (Gisin, 1960), die auf Bäckerhefe kultiviert wurden, eingesetzt. Die Gefäße wurden im Gewächshaus (Durchschnittstemperatur: 18 °C, relative Feuchtigkeit: 50-60 %, Tageslänge: 12 h) in einer randomisierten Blockanlage angeordnet und regelmäßig auf 60 % WHK bewässert.

Im ersten Versuch, bei dem die Effekte der Anwendung unterschiedlicher Biokohlen (Pyro, HTC, Pyreg, HTC\_ferm) im Vordergrund standen, wurde Boden mit zerkleinerten Biokohlen (Partikelgröße  $\leq 3$  mm) gemischt, um den organischen Kohlenstoffgehalt von 0.73 % auf 1.0 % zu erhöhen. Dafür wurden zu 2.5 kg Boden 9.8 g Pyro-Biokohle (Pyro), 13.6 g Pyreg-Biokohle (Pyreg), 16.4 g HTC-Biokohle (HTC) und 36.1 g fermentierte HTC-Biokohle (HTC\_ferm) hinzugefügt. Die Kontrolle erhielt keine Biokohle und jede Variante wurde vierfach wiederholt.

Basierend auf den Ergebnissen des ersten Versuchs wurden im zweiten Versuch unterschiedliche Mengen der fermentierten HTC-Biokohle getestet. Organische Bodenkohlenstoffgehalte reichten von 0.73 % (Kontrolle) bis 1, 2, und 4 %, d.h. 30.3 g, 142.5 g und 367 g Biokohle (HTC\_ferm) wurden in 2.5 kg Boden eingemischt.

Für den dritten Versuch, der die Untersuchung von Biokohle-Collembolen Interaktionen fokussierte, wurde der organische Kohlenstoffgehalt des Bodens von 0.73 % auf 1.0 % durch die Anwendung von 7.8 g Pyro-Biokohle (Pyro) in 2 kg Boden angehoben. Die Behandlungen waren: Boden (KON), mit Collembolen (COLL), mit Pyro-Biokohle (PYRO) sowie mit Pyro-Biokohle und mit Collembolen (PYRO+COLL). Jede Behandlung hatte 5 Wiederholungen. Zur verbesserten Charakterisierung der Wurzeleigenschaften wurde nur eine vorgekeimte Sommerweizenpflanze in die Mitte der Glasgefäße gepflanzt und aufgrund der geringeren Pflanzenanzahl nur 50 Individuen von *P. fimata* pro Gefäß eingesetzt.

## Analysen

Sprosse und Wurzeln von Sommerweizen wurden zum Wachstumsstadium der Blüte (Versuch 1 + 2) und Bestockung (Versuch 3) des Haupttriebs (BBCH-Stadium: 65 + 33; Meier (1997)), hier 7,5 und 5 Wochen nach Bepflanzung geerntet. Die Sprosse wurden an der Stammbasis abgeschnitten und bei 60 °C für 48 h getrocknet. Wurzeln und Boden wurden aus dem Gefäß in eine Kunststoffschale überführt, mit

Leitungswasser eingeweicht, und die an der Oberfläche treibenden Collembolen mit einem Pinsel aufgenommen, gezählt und in Alkohol fixiert. Wurzeln wurden gewaschen und bei 60 °C für 48 h getrocknet. Für den dritten Versuch wurden die Wurzeln bei 600 dpi mit einem Flachbett-HP Scanjet 2400 für die digitale Analyse gescannt und anschließend getrocknet. Die Bildanalyse wurde mit WinRHIZO 2012b Software (Regent Instruments, Quebec, Kanada) durchgeführt.

### 6.2.2 Feldversuch

#### Probenahme

Die Proben wurden am 06. März 2013, 28. April 2013 und 23. Oktober 2013 aus dem Feldversuch in Berge in den jeweiligen Untersuchungsparzellen entnommen (Abb. A1). Es wurden die Varianten Kontrolle+100 % N (113), Pyro+100 % N (213), HTC+100 % N (313), HTC\_ferm+100 % N (323) und Pyreg+100 % N (413) beprobt, so dass 20 Proben pro Termin entnommen wurden. Für die Probenahme wurden Bodenkerne mit einem Durchmesser von 20 cm in einer Tiefe von 0-10 cm gesammelt.

#### Probenaufbereitung und Analyse

Die im Bodenkern befindlichen Bodentierchen wurden aus der Probe mithilfe eines Hochgradientextraktors (Kempson, 1962; Macfadyen, 1953) extrahiert. Dabei wurde die Temperatur in 5 °C Schritten, von 20 °C am ersten Tag bis 40 °C am achten Tag erhöht. Durch die von oben auf den Bodenkern wirkende Wärme trocknet dieser aus und die Fauna wandert entlang des Feuchtegradienten nach unten aus. Dort wurden sie in einer Lösung aus Propylenglycol und Wasser (1:1) gesammelt, anschließend in Alkohol fixiert und bis zur Analyse in einem Kühlschrank aufbewahrt. Die Proben wurden unter einem Binocular (Nikon SMZ-U) sortiert. Mithilfe des Buches von Bährmann (1995) wurden alle Bodentierchen (z.B. Regenwürmer, Milben, Drathwurmlarven) einer taxonomischen Gruppe zugeordnet. Die Collembolen wurden mithilfe des Bestimmungsschlüssels von Hopkin (2007) unter dem Mikroskop (Leitz Diaplan) bis zur Art bestimmt.

Für die Bestimmung des Artenreichtums (SR) der Collembolen wurde die Formel  $SR = (s - 1) / \log_e N$  (Yeates und Bird, 1994) und für den Shannon-Wiener Diversitätsindex die Formel  $H' = -\sum p_i \log_e p_i$  (Pielou, 1971) verwendet, wobei s die

Summe der Arten,  $N$  die Anzahl der Individuen pro Probe und  $p_i$  die relative Dichte der  $i$ ten Art ist.

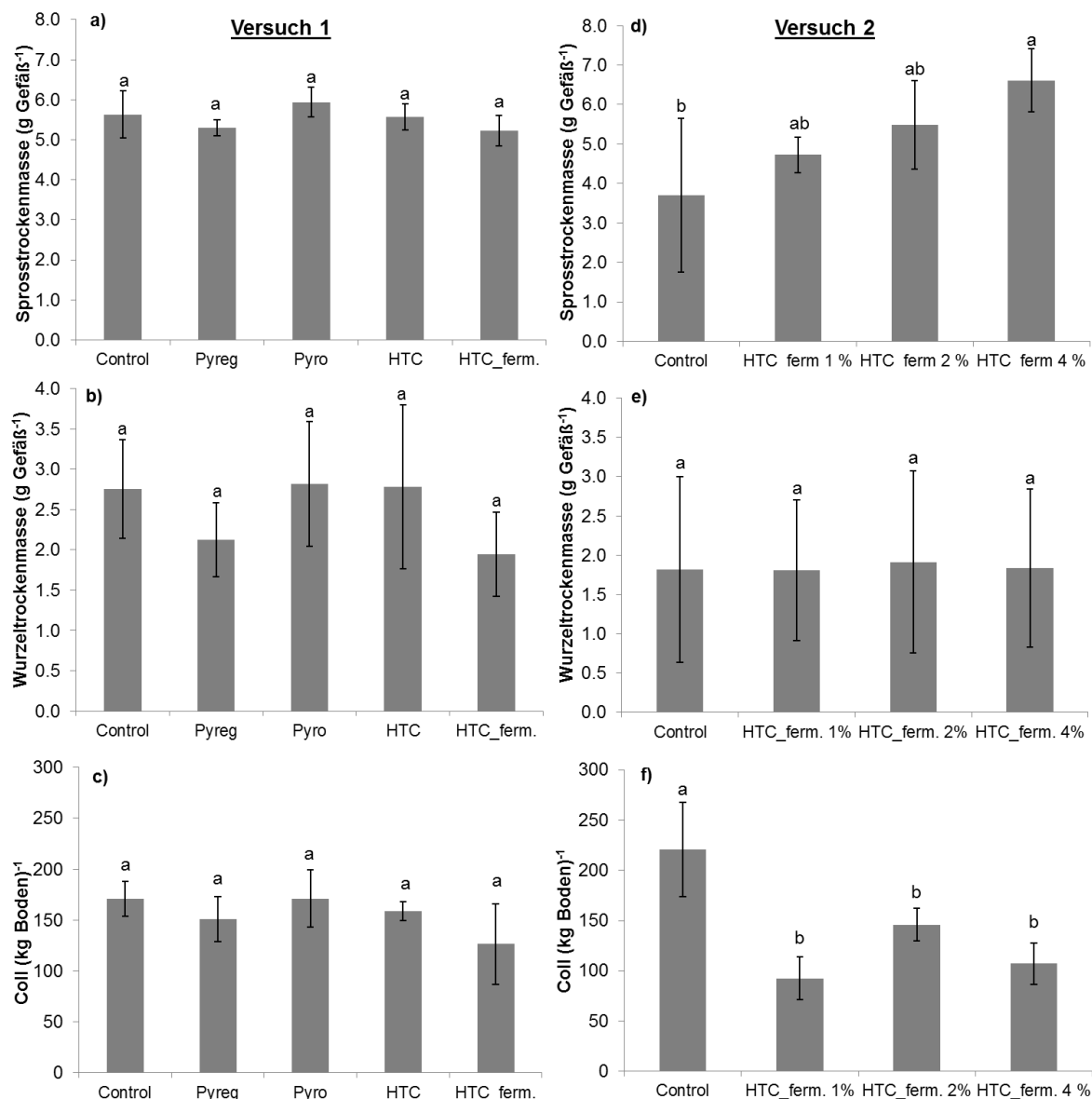
### Statische Analyse für die Gefäß- und Felduntersuchungen

Alle statistischen Analysen für die Gefäßversuche wurden mit SAS Version 9.4 (SAS Institute, Cary, NC) durchgeführt. Für die Gefäßversuche 1 + 2 wurden Spross- und Wurzeltrockenmasse sowie die Anzahl der Collembolen (log-transformiert) statistisch mit der einfaktoriellen ANOVA, gefolgt von Tukey's HSD Test bei  $P \leq 0.05$  analysiert. Alternative Modelle mit Verallgemeinerten Linearen Modellen (quasipoisson-Verteilung) ergaben ähnliche Ergebnisse. Es wurden keine Blockeffekte nachgewiesen. Für die Analyse der Daten aus dem Gefäßversuch 3 wurde die zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Biokohle und Collembola, gefolgt vom Tukey's HSD Test verwendet. Die statistischen Analysen für die Feldversuche wurden mit SPSS (SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows) ausgewertet. Die Gesamtabundanzen der Bodentiere sowie die Gesamtabundanzen der Collembolen aus dem Feld wurden zum einen mit der zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren Zeit und Behandlung ausgewertet sowie zum anderen mit der einfaktoriellen ANOVA zum Vergleich der Abundanzen zwischen den Behandlungen (log-transformiert). Die Artenstruktur der Collembolen sowie der gesamten Bodentiere wurde mit der zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren Biokohle und Block ausgewertet. Trotz der log-Transformierung zur Auswertung der Daten werden die Abundanzen als Individuen  $m^{-2}$  dargestellt.

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Gefäßversuch

In Experiment 1 wurden Spross- und Wurzeltrockenmasse von Sommerweizen nicht signifikant durch die Anwendung der Biokohlen beeinflusst (Abb. 20 a, b). In ähnlicher Weise wurde die Abundanz von *P. fimata* nicht verändert; jedoch nahm die Population von 171 zu 126 Individuen  $(kg\ Boden)^{-1}$  in der Kontrolle, verglichen zur Behandlung mit HTC\_ferm, ab (Abb. 20 c,  $P = 0.089$ ).



**Abbildung 20:** Sommerweizen und Collembolen im ersten Versuch beim Test unterschiedlicher Biokohlen (a,b,c) und im zweiten Versuch beim Test unterschiedlicher Mengen fermentierter HTC-Biokohle (d,e,f). Dargestellt sind die Sprossstrockenmassen (g Gefäß<sup>-1</sup>), Wurzeltrockenmassen (g Gefäß<sup>-1</sup>) und Collembolen (kg Boden)<sup>-1</sup>. (MW ± SD); (Control = Kontrolle, Coll = Collembolen); Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Auf dieser Grundlage wurden verschiedene Mengen fermentierter HTC-Biokohle in Experiment 2 verglichen. Die Sprossbiomasse der Pflanzen in der Variante mit 4 % HTC\_ferm war im Vergleich zu den Pflanzen in der Kontrollvariante deutlich höher (Abb. 20d), während die Wurzelbiomasse nicht beeinflusst wurde (Abb. 20e). Im Gegensatz dazu zeigte der Einsatz von fermentierter HTC-Biokohle deutlich negative Auswirkungen auf die Abundanz von *P. fimata*, unabhängig von der verwendeten Menge (Abb. 20f).

Im Versuch 3, mit dem Schwerpunkt auf der Interaktion von Pyro-Biokohle und Collembolen und deren Auswirkung auf die Pflanzenleistung, wurde kein Einfluss der Collembolen auf Spross- und Wurzeltrockenmasse, Wurzellänge und Anzahl der Wurzelspitzen nachgewiesen (Tab. 18).

**Tabelle 18:** Effekte der Biokohle (PYRO) und Collembolen (COLL) auf Spross- und Wurzelwachstum und die Wurzelmorphologie von Sommerweizen (MW  $\pm$  SD) (KON = Kontrolle, COLL = Collembolen). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen in den Zeilen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Parameter	Einheit	KON	COLL	PYRO	PYRO+COLL	P Wert
Spross-trockenmasse	g	0.28 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	0.25 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	0.41 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	0.38 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.129
Wurzel-trockenmasse	g	0.15 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.13 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.19 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.15 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	0.117
Wurzellänge	cm	653 $\pm$ 113 <sup>a</sup>	658 $\pm$ 88 <sup>a</sup>	715 $\pm$ 93 <sup>a</sup>	682 $\pm$ 140 <sup>a</sup>	0.810
Wurzel-durchmesser	mm	0.65 $\pm$ 0.03 <sup>ab</sup>	0.59 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	0.73 $\pm$ 0.10 <sup>a</sup>	0.65 $\pm$ 0.04 <sup>ab</sup>	0.024
Wurzelvolumen	cm <sup>3</sup>	2.17 $\pm$ 0.33 <sup>b</sup>	1.84 $\pm$ 0.41 <sup>b</sup>	3.00 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	2.27 $\pm$ 0.47 <sup>ab</sup>	0.005
Wurzelspitzen	Anzahl	946 $\pm$ 245 <sup>a</sup>	1110 $\pm$ 596 <sup>a</sup>	975 $\pm$ 315 <sup>a</sup>	1055 $\pm$ 821 <sup>a</sup>	0.968

Die Anwendung von Pyro-Biokohle im Boden führte zu einem höheren Wurzeldurchmesser im Vergleich zu der Variante COLL ( $F_{3,15} = 4.228$ ,  $P = 0,024$ ) und einem höheren Wurzelvolumen im Vergleich zu den Varianten mit Collembolen (COLL) oder Kontrolle (KON) ( $F_{3,15} = 6.398$ ,  $P = 0,005$ ). Die zweifaktorielle ANOVA ergab keine signifikanten Interaktionen. Die Abundanz von *P. fimata* pro Gefäß war am Ende des Versuchs geringer als ursprünglich eingesetzt (25 Ind. kg<sup>-1</sup> Boden) mit  $13 \pm 5$  und  $17 \pm 11$  Individuen (kg Boden<sup>-1</sup>) in COLL und PYRO + COLL-Behandlungen.

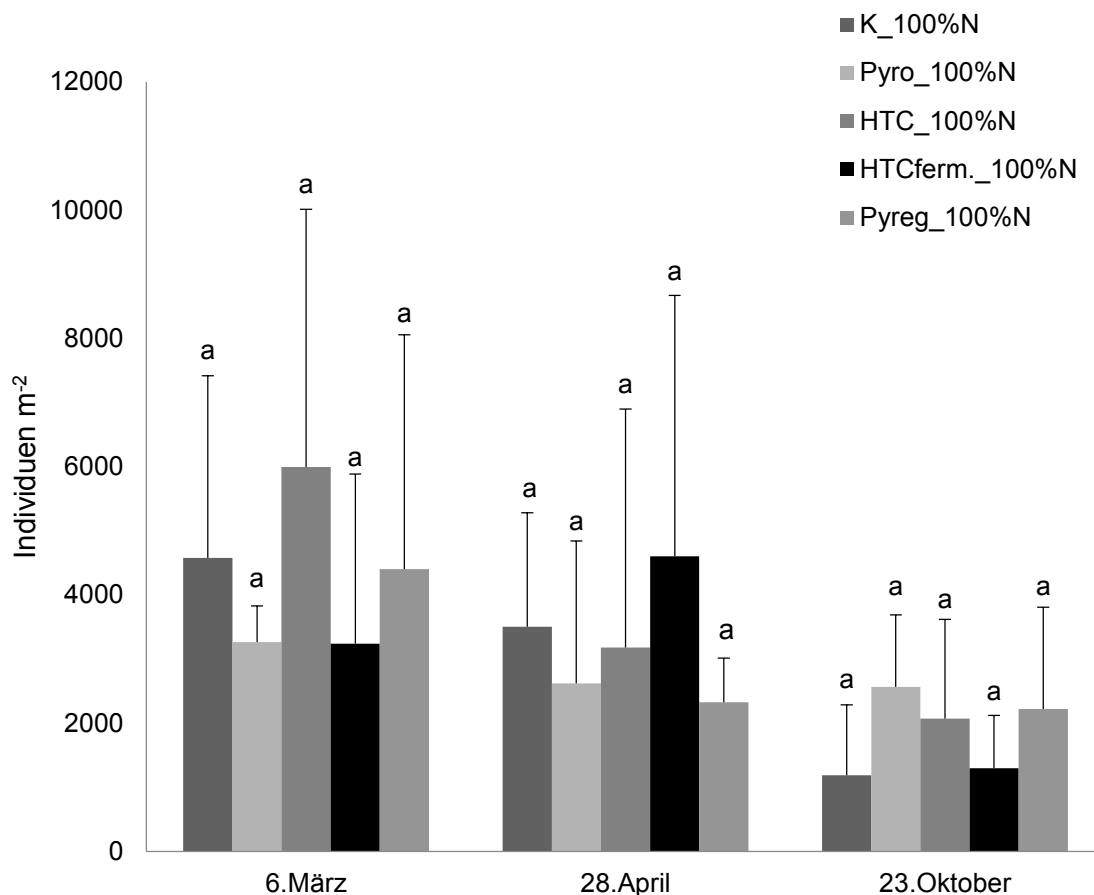
### 6.3.2 Feldversuch

#### Populationsdichte

Insgesamt wurden bis zu 18 Taxa aus 5 Gruppen der Bodenfauna auf den Flächen nachgewiesen (Tabellen A7-A9). Die meisten Taxa gehörten zu der Gruppe der



Insecta (Insekten). Die Gesamtpopulationsdichte aller erfassten Gruppen der Bodenfauna zeigt Abbildung 21.



**Abbildung 21:** Populationsdichte der Bodenfauna (inkl. Collembolen) an 3 Terminen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

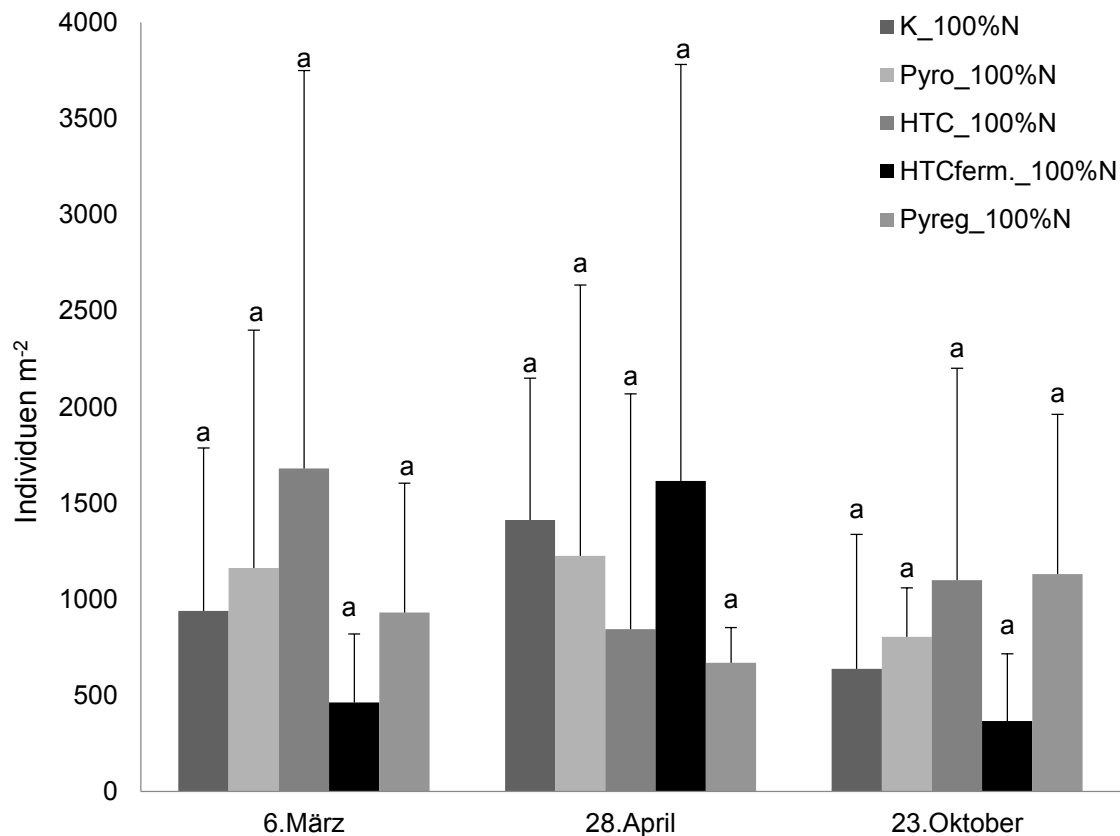
Im März lag die Populationsdichte zwischen 3240 und 5994 Individuen  $m^{-2}$ , im April zwischen 2324 und 4601 Individuen  $m^{-2}$  und im Oktober zwischen 1186 und 2563 Individuen  $m^{-2}$ . Die einfaktorielle ANOVA zeigte für die Populationsdichte zu den jeweiligen Terminen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen. Die Populationsdichten der Varianten Kontrolle und HTC\_100 % N nahmen von März bis Oktober deutlich ab. Bei der Variante HTCferm\_100 % N war die Populationsdichte im April am höchsten. Die zweifaktorielle Analyse mit den Faktoren Behandlung (Biokohle) und Termin ergab, dass die Populationsdichten zur ersten Probenahme im März signifikant höher waren als zur dritten Probenahme im Oktober. Die Populationsdichte im April lag zwischen der von März und Oktober und unterschied sich nicht signifikant von den Terminen (Abb. 21).

## Gemeinschaftsstruktur der Bodenfauna

Die Bodenfauna wurde von den Gruppen der Mesofauna dominiert, insbesondere Milben (Acari) mit 398 bis 3917 Individuen  $\text{m}^{-2}$ , gefolgt von den Springschwänzen (Collembola) mit 366 bis 1489 Individuen  $\text{m}^{-2}$ . Mittlere Dichten erreichten die Vielfüßer (Myriapoda) mit der Gruppe der Wenigfüßer (Pauropoda), wohingegen Hundertfüßer (Chilopoda) eher selten und Tausendfüßer (Diplopoda) nicht auftraten. Zudem waren Insektenlarven aus der Gruppe Coleoptera häufig vorhanden. Bei den Ringelwürmern (Annelida) waren die Borstenwürmer (Enchytraeida) dominant, Regenwürmer (Lumbricida) dagegen eher selten. Adulte Insekten, Webspinnen (Araneae) und Asseln (Isopoda) wurden nur vereinzelt nachgewiesen (Tab. A7-A9).

## Abundanz und Artenstruktur der Collembolen

Im März lag die Populationsdichte der Collembolen zwischen 462 und 1680 Individuen  $\text{m}^{-2}$ , im April zwischen 669 und 1616 Individuen  $\text{m}^{-2}$  und im Oktober zwischen 366 und 1130 Individuen  $\text{m}^{-2}$  (Abb. 22). Die einfaktorielle ANOVA zeigte für die Populationsdichte zu den jeweiligen Terminen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen.



**Abbildung 22:** Abundanzen der Collembolen an 3 Terminen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

Es zeigte sich eine differenzierte Entwicklung der Populationsdichte der Collembolen an den unterschiedlichen Terminen, d.h. im Jahresgang (Abb. 22). Die Populationsdichten in der Kontrolle, Pyro\_100 % N und HTCferm\_100 % N waren im April am höchsten und im Oktober am geringsten. Im Gegensatz dazu waren die Populationsdichten der Varianten HTC\_100 % N und Pyreg\_100 % N im April am geringsten und stiegen im Oktober wieder an. Insgesamt wurden in der zweifaktoriellen ANOVA keine Unterschiede zwischen den Behandlungen und den Terminen festgestellt.

Die Artenstruktur der Collembolen der ersten Probenahme (6. März) ist in Tabelle 19 dargestellt. Dabei wurden die epedaphischen (auf der Bodenoberfläche lebende) Arten *Isotoma viridis*, *Pseudisotoma sensibilis* und *Sminthurus viridis*, die hemiedaphischen (in den oberflächennahen Bodenzonen lebende) Arten *Folsomia candida*, *Folsomia similis*, *Isotomorus plumosus*, *Xenylla acauda* und *Xenylla maritima* sowie die euedaphischen (im Boden lebende) Arten *Isotomodes productus*, *Willemia anophthalma* und *Willowsia buski* gefunden. Die Summe der Arten variierte

zwischen acht (HTC\_100 % N) und elf (HTCferm\_100 % N) (Tab. 19). Der errechnete Wert für den Artenreichtum (SR) lag zwischen 1.63 und 1.93.

**Tabelle 19:** Artenstruktur der Collembolen der ersten Probenahme (6. März 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben sind Abundanz der Arten (Individuen m<sup>-2</sup> ± SD), Summe der Arten und Diversitätsindex. SR – Artenreichtum. E = epedaphische, H = hemiedaphische, EU = euedaphische Art; ANOVA mit  $P \leq 0.05$ .

Art	Lebens- form	K_ 100 % N	Pyro_ 100 % N	HTC_ 100 % N	HTCferm_ 100 % N	Pyreg_ 100 % N
<i>Isotoma viridis</i>	EP	151 ± 240	276 ± 285	326 ± 507	159 ± 94	64 ± 69
<i>Pseudisotoma sensibilis</i>	EP	8 ± 16	0	103 ± 207	48 ± 96	72 ± 91
<i>Sminthurus viridis</i>	EP	32 ± 64	11 ± 18	0	103 ± 71	8 ± 16
<i>Folsomia candida</i>	H	167 ± 183	106 ± 112	263 ± 421	159 ± 145	96 ± 130
<i>Folsomia similis</i>	H	183 ± 209	180 ± 163	287 ± 470	183 ± 163	88 ± 108
<i>Isotomorus plumosus</i>	H	96 ± 152	318 ± 391	119 ± 177	16 ± 32	48 ± 76
<i>Xenylla acauda</i>	H	127 ± 129	11 ± 18	103 ± 126	16 ± 32	56 ± 111
<i>Xenylla maritima</i>	H	56 ± 91	0	8 ± 16	16 ± 18	0
<i>Isotomodes productus</i>	EU	0	21 ± 37	0	0	8 ± 16
<i>Willemia anophthalma</i>	EU	96 ± 26	85 ± 18	279 ± 354	111 ± 41	111 ± 66
<i>Willowsia buski</i>	EU	24 ± 48	32 ± 32	0	32 ± 27	0
Summe der Arten		10	9	8	11	9
Artenreichtum (SR)		1.87 ± 0.37	1.63 ± 0.37	1.69 ± 0.42	1.93 ± 0.39	1.72 ± 0.11

Die zweifaktorielle Analyse mit den Faktoren Biokohle und Block zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten der jeweiligen Arten, der Gesamtanzahl, der Summe der Arten sowie dem Artenreichtum. Weder die Biokohle noch der Blockfaktor waren signifikant.

Im Gegensatz zur ersten Probenahme wurden zur zweiten Probenahme (28. April) (Tab. 20) mehr epedaphische Arten gefunden. Zu den epedaphischen Arten vom ersten Termin wurden außerdem die Kugelspringer *Sminthurus niger* und *Stenacidia violacea festgestellt*. Die euedaphische Art *Isotomodes productus* war in den Proben nicht zu finden, so dass die Gesamtartenzahl mit 10 und 12 Arten etwas höher lag als im Monat davor (Tab. 20). Dies spiegelt sich auch in einem höheren Artenreichtum (SR = 1.69-2.25) wider. Die zweifaktorielle Analyse mit den Faktoren Biokohle und Block zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen bei den Arten, bei der Gesamtanzahl, der Summe der Arten sowie dem Artenreichtum.

**Tabelle 20:** Artenstruktur der Collembolen der zweiten Probenahme (28. April 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben sind Abundanz der Arten (Individuen m<sup>-2</sup> ± SD), Summe der Arten und Diversitätsindex. SR – Artenreichtum. E = epedaphische, H = hemiedaphische, EU = euedaphische Art; ANOVA mit  $P \leq 0.05$ .

Art	Lebens- form	K_ 100 % N	Pyro_ 100 % N	HTC_ 100 % N	HTCferm_ 100 % N	Pyreg_ 100 % N
<i>Isotoma viridis</i>	EP	202 ± 49	438 ± 516	175 ± 308	517 ± 801	191 ± 69
<i>Pseudisotoma sensibilis</i>	EP	180 ± 80	111 ± 96	72 ± 102	48 ± 41	64 ± 58
<i>Sminthurus viridis</i>	EP	21 ± 37	0	16 ± 32	8 ± 16	0
<i>Sminthurus niger</i>	EP	21 ± 18	24 ± 48	8 ± 16	32 ± 37	16 ± 18
<i>Stenacidia violacea</i>	EP	32 ± 55	0	8 ± 16	40 ± 80	24 ± 31
<i>Isotomorus plumosus</i>	H	85 ± 121	40 ± 40	24 ± 30	72 ± 105	0
<i>Folsomia candida</i>	H	96 ± 110	119 ± 177	167 ± 271	159 ± 278	72 ± 123
<i>Folsomia similis</i>	H	85 ± 66	175 ± 267	207 ± 373	215 ± 346	64 ± 52
<i>Xenylla acauda</i>	H	149 ± 102	86 ± 175	24 ± 48	199 ± 155	16 ± 32
<i>Xenylla maritima</i>	H	202 ± 49	127 ± 121	16 ± 18	151 ± 188	32 ± 37
<i>Willemia anophthalma</i>	EU	244 ± 285	72 ± 84	56 ± 91	103 ± 207	72 ± 71
<i>Willowsia buski</i>	EU	96 ± 96	32 ± 36	72 ± 143	72 ± 91	119 ± 54
Summe der Arten		12	10	12	12	10
Artenreichtum (SR)		2.25 ± 0.28	1.80 ± 0.39	1.96 ± 0.61	1.69 ± 0.34	1.83 ± 0.12

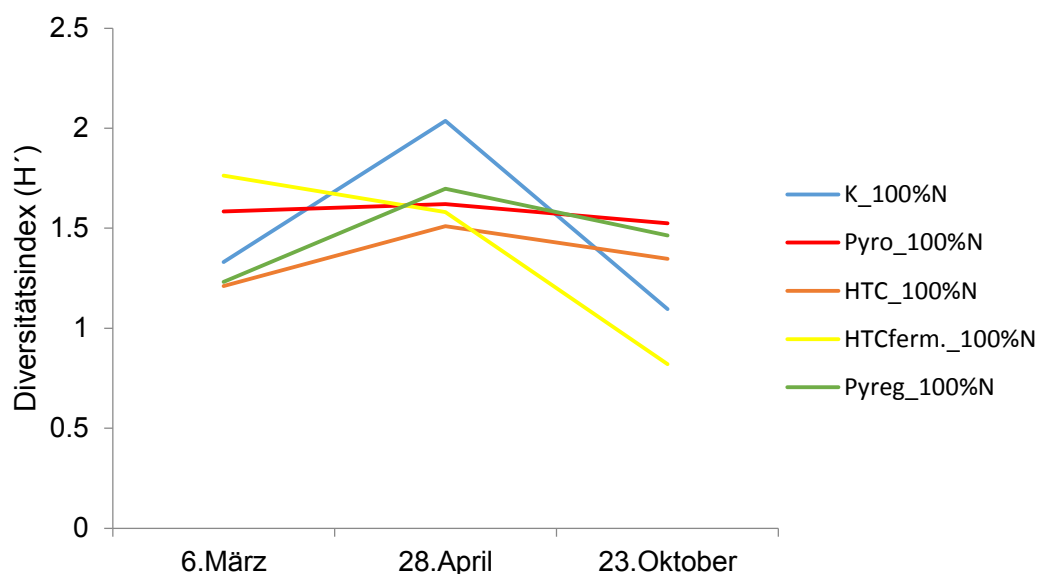
Die geringste Summe der Arten mit 6 (HTCferm\_100 % N) bis 9 (restliche Behandlungen) wurde beim dritten Termin gefunden (Tab. 21). Dabei sind die gleichen epedaphischen und hemiedaphischen Arten wie bei der ersten Probenahme (6. März) bestimmt worden, allerdings waren die euedaphischen Arten *Isotomodes productus* und *Willowsia buski* nicht präsent. Als Konsequenz war der Artenreichtum (SR = 1.09-1.58) zum Termin im Herbst deutlich geringer als zu den beiden Terminen im Frühjahr. In der zweifaktoriellen Analyse wurden keine signifikanten Unterschiede bei den Arten, der Gesamtanzahl, der Summe der Arten und dem Artenreichtum nachgewiesen (Tab. 21).

**Tabelle 21:** Artenstruktur der Collembolen der dritten Probenahme (23. Oktober 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben sind Abundanz der Arten (Individuen m<sup>-2</sup> ± SD), Summe der Arten und Diversitätsindex. SR – Artenreichtum. E = epedaphische, H = hemiedaphische, EU = euedaphische Art; ANOVA mit  $P \leq 0.05$ .

Art	Lebens- form	K_ 100 % N	Pyro_ 100 % N	HTC_ 100 % N	HTCferm_ 100 % N	Pyreg_ 100 % N
<i>Isotoma viridis</i>	EP	119 ± 138	183 ± 181	111 ± 183	88 ± 71	255 ± 302
<i>Pseudisotoma sensibilis</i>	EP	8 ± 16	88 ± 136	103 ± 150	40 ± 60	119 ± 159
<i>Sminthurus viridis</i>	EP	16 ± 32	24 ± 30	8 ± 16	0	80 ± 76
<i>Isotomorus plumosus</i>	H	8 ± 116	24 ± 30	16 ± 32	0	64 ± 45
<i>Xenylla acauda</i>	H	8 ± 16	16 ± 32	16 ± 32	24 ± 48	8 ± 16
<i>Xenylla maritima</i>	H	56 ± 75	96 ± 69	159 ± 219	24 ± 30	48 ± 55
<i>Folsomia candida</i>	H	207 ± 263	56 ± 48	263 ± 249	0	151 ± 167
<i>Folsomia similis</i>	H	143 ± 246	279 ± 80	342 ± 413	167 ± 163	318 ± 256
<i>Willemia anophthalma</i>	EU	72 ± 40	40 ± 40	80 ± 139	24 ± 48	88 ± 102
Summe der Arten		9	9	9	6	9
Artenreichtum (SR)		1.57 ± 0.29	1.58 ± 0.29	1.34 ± 0.52	1.09 ± 0.16	1.42 ± 0.21

### Diversitätsindices der Collembolenfauna

Sowohl der Reichtum der Arten (SR, s. Tabelle 19, 20, 21) als auch der Shannon-Wiener Index ( $H'$ , Abb. 23) zeigten signifikante Unterschiede zwischen den Terminen ( $F_{2,14} = 3.383$ ,  $P = 0.043$ ) (Abb. 23). Insgesamt erreichte die Collembolenfauna am zweiten Termin im späten Frühjahr die signifikant höchste Diversität im Vergleich zum Herbst. Der Frühjahrstermin im März lag zwischen den beiden Terminen.

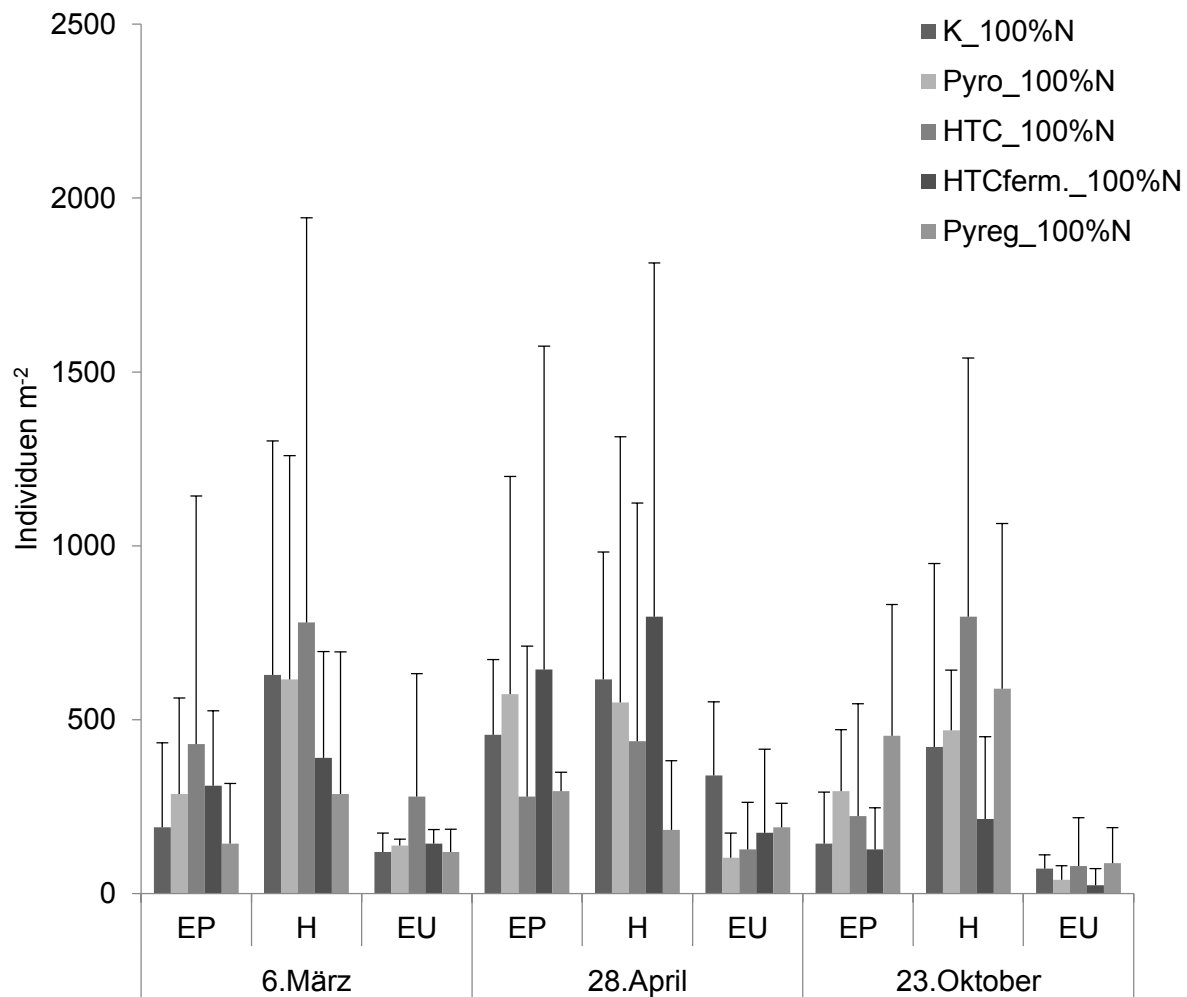


**Abbildung 23:** Shannon-Wiener Diversität ( $H'$ ) der Collembolenfauna im Jahresverlauf im Boden der unterschiedlichen Behandlungen.

Zu allen drei Terminen zeigten die Biokohlen beim Shannon-Wiener-Index ( $H'$ ) keine signifikanten Abweichungen und bildeten eine homogene Gruppe.

#### Collembolen nach Lebensform

Um die Collembolen zu den jeweiligen Terminen nach Lebensformen darzustellen, wurden jeweils epedaphische, hemiedaphische und euedaphische Arten der jeweiligen Behandlungen zu den Terminen aufsummiert (Abb. 24). Zu allen Terminen fanden sich die meisten Tiere in den hemiedaphischen Arten mit 286-780 Individuen  $m^{-2}$  im März, 183-644 Individuen  $m^{-2}$  im April und 127-453 Individuen  $m^{-2}$  im Oktober. Die epedaphischen Arten variierten zwischen 127 und 644 Individuen  $m^{-2}$  im Jahresverlauf und die euedaphischen zwischen 39 und 339 Individuen  $m^{-2}$ . Im Herbst war das Auftreten der euedaphischen Collembolen geringer als das der epedaphischen und hemiedaphischen Formen.



**Abbildung 24:** Aufteilung der Collembolen nach Lebensformen zu den drei Terminen. (Individuen m<sup>-2</sup> ± SD), EP - epedaphisch, H - hemiedaphisch, EU - euedaphisch.

Die statistische Analyse zeigte jedoch keine Unterschiede zwischen den Behandlungen und dem Auftreten der Lebensformtypen zu den verschiedenen Terminen.

## 6.4 Diskussion

### Gefäßversuche

Wie von Lehmann et al. (2011) berichtet, zeigten die Auswirkungen der Anwendung von Biokohlen auf die Bodenmikroorganismen, Fauna und Pflanzen ein breites Spektrum, vor allem aufgrund der großen Schwankungen in den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Biokohlen. Die vorliegende Studie berücksichtigt diese Unterschiede in den Biokohleeigenschaften und untersuchte zwei Pyrolyse-Biokohlen, mit hohen (Pyro) und niedrigen (Pyreg) Nährstoffgehalten und zwei



HTC-Biokohlen, entweder fermentiert (HTC\_ferm) oder nicht (HTC). Die Biokohlemengen wurden so berechnet, dass der C<sub>org</sub>-Gehalt des Bodens von 0.73 % auf 1.0 % erhöht wurde. Dennoch blieben grundlegende Eigenschaften der Biokohlen wie Makronährstoffgehalte, pH-Wert und Oberfläche unterschiedlich. Keine der getesteten Biokohlen hatte Auswirkungen auf die Spross- oder Wurzelbiomasse von Sommerweizen. Ein Grund könnte der in dieser Studie verwendete lehmige Sand sein, da Biokohleanwendungen vor allem in tonreichen Böden die Festigkeit des Bodens reduziert, wodurch Wurzellängen und die Ausbreitung der Wurzeln (Chan und Xu, 2009) gefördert werden. Ebenso wie die Pflanzen wurden die Collembolen nicht durch die Anwendung der Biokohle beeinflusst.

Im Vergleich zu Pyrolyse-Biokohlen wird die Anwendung der HTC-Biokohlen vorgeschlagen, um das Bodenleben mit mehr C-Quellen sowie Makro- und Mikroporen zu versorgen (Bargmann et al., 2014a; Sevilla und Fuertes, 2009; Sevilla et al., 2011). Diese Funktionen können das mikrobielle Wachstum und die Aktivität und damit das Pflanzenwachstum fördern (Anderson et al., 2011; Quilliam et al., 2013). Entsprechend führten steigende Mengen von fermentierter HTC-Biokohle in der vorliegenden Studie zu einer höheren Sprossbiomasse und einem erhöhten Spross:Wurzel-Verhältnis (2.37 in der Kontrolle und 4.25 in der Variante HTC\_ferm). Dies dürfte auf den fördernden Einfluss durch das niedrige C:N-Verhältnis und / oder den neutralen pH-Wert der HTC\_ferm auf das Wachstum von Sommerweizen, zurückzuführen sein. Auf der anderen Seite, war die Abundanz von *P. fimata* in der Variante HTC\_ferm deutlich geringer, was darauf hinweist, dass auch die Collembolen-Pflanzen-Interaktionen den Pflanzenertrag beeinflusst haben könnten. Wurzeln können als Nahrung für Collembolen dienen (Endlweber und Scheu, 2006; Ngosong et al., 2014), und deren Rückgang auf etwa die Hälfte durch HTC\_ferm dürfte die Fraßaktivität reduziert haben. Die Abnahme der Abundanz von *P. fimata* zeigt zudem die schädliche Wirkung von HTC\_ferm. HTC-Biokohle kann durch Collembolen konsumiert werden, was deren Fitness reduziert (Salem et al., 2013a). Dieser negative Einfluss kann mit phenolischen und aromatischen Verbindungen der HTC-Biokohle in Zusammenhang gebracht werden (Libra et al., 2011). Im Gegensatz dazu zeigten Marks et al. (2014), dass *Folsomia fimetaria* den Lebenszyklus auch beim ausschließlichen Nahrungsangebot von HTC-Biokohle beenden kann. Die Studien deuten darauf hin, dass es keinen allgemeinen "Biokohle-Effekt" auf

Bodenmikroarthropoden gibt, sondern Antworten auf die einzusetzende Art und Menge der Biokohlen gefunden werden müssen.

Pyro-Biokohle, die nährstoffreichste Biokohle in der vorliegenden Studie, verändert die Wurzelmorphologie der Weizenpflanzen, vor allem die Wurzeldicke und das Wurzelvolumen, im Vergleich zu Böden ohne Biokohle aber mit Collembolen. Ähnliche Auswirkungen von *P. fimata* auf das Pflanzenwachstum von *C. arvense* und *E. adnatum* mit längeren und dünneren Wurzeln aber unveränderter Spross- und Wurzelbiomasse wurden berichtet (Endlweber und Scheu, 2006, 2007). Interessanterweise liegen Wurzeldurchmesser und Wurzelvolumen des Weizens in Böden kombiniert mit Pyro-Biokohle und Collembolen im Bereich zwischen den höchsten (PYRO) und geringsten (COLL) Werten. Dies deutet darauf hin, dass die Collembolen den positiven Effekt der Pyro-Biokohle auf die Wurzelmorphologie wahrscheinlich durch Wurzelfraß reduzieren. Das stimmt mit weiteren Labor- (Endlweber et al., 2009) und Felduntersuchungen (Haubert et al., 2009; Ngosong et al., 2009) überein, welche zeigten, dass Collembolen Pflanzenwurzeln als Nahrung gegenüber Pilzen bevorzugen.

#### Feldversuche

Sowohl bei den Populationsdichten der Gesamtindividuen als auch bei den Abundanzen der einzelnen Collembolenarten traten hohe Standardabweichungen innerhalb der vier Wiederholungen der Varianten auf. Dadurch ergaben sich zwischen den geprüften Biokohlen im Feldversuch zu keinem Termin signifikante Unterschiede. Hohe Standardabweichungen sind auch aus anderen Felduntersuchungen bekannt (Kautz, 2004; Kautz et al., 2006; Ngosong et al., 2009), da die Tiere häufig geklumpt auftreten. Zahlreiche Studien zeigen eine erhöhte mikrobielle Biomasse bei der Anwendung von Biokohlen (Bargmann et al., 2014a; Domene et al., 2014; Lehmann et al., 2011), was in Folge auch die Zersetzerfauna fördern (Cole et al., 2004b) und damit die Bodenfauna positiv beeinflussen kann. Dieser positive Einfluss wurde von Domene et al. (2014), die die Fraßaktivität der Bodenfauna untersuchten, sowie in den vorliegenden Studien nicht nachgewiesen. Andere Studien zeigten keine negativen Effekte von Biokohlen auf Collembolen und Regenwürmer (Domene et al., 2014; Van Zwieten et al., 2010). Im vorliegenden Feldversuch wurden geringe Mengen an Biokohle ausgebracht ( $9\text{--}14\text{ t ha}^{-1}\text{ TM}$ ), um die potentiellen Effekte einer zukünftigen praxisüblichen Anwendung zu simulieren.

Studien mit unterschiedlichen Biokohlemengen wären für weitere Aussagen über deren Auswirkungen auf die Bodenfauna sinnvoll.

Im Gegensatz zur Behandlung mit Biokohle, zeigten der Jahresgang und damit die Entwicklung der Ackerfrucht Auswirkungen auf Abundanz und Struktur der Collembolengemeinschaft. Zwischen den Terminen traten Unterschiede sowohl in der Gesamtabundanz der Bodentiere als auch beim Artenreichtum (SR) und Shannon-Wiener-Index ( $H'$ ) der Collembolen auf. Der Rückgang der Populationsdichte der Bodentiere zum dritten Termin lässt sich durch die Ernte des Winterweizens, den Pflugeinsatz sowie die Aussaat des nachfolgenden Winterroggens erklären. Der Winterroggen war zur Probenahme bereits aufgelaufen, allerdings erst etwa 10 cm groß, so dass möglicherweise weniger Nahrung als bei den ersten beiden Probenahmen für die Bodentiere zur Verfügung stand. In einer Studie von Kautz et al. (2006) kommen die Autoren ebenfalls zu dem Schluss, dass Bodenmikroarthropoden durch das Nahrungsangebot eher beeinflusst werden als durch bodenchemische Parameter wie den Kohlenstoffgehalt oder den pH-Wert.

Im Vergleich zu Ngosong et al. (2009) wurden in der durchgeführten Studie insgesamt weniger Collembolen  $m^{-2}$  gefunden, was auf unterschiedliche Bodencharakteristika und Bewirtschaftungsweise zurückzuführen sein dürfte. In weiteren Studien wurde gezeigt, dass die Populationsdichten bei biologischer Bewirtschaftung höher waren als in konventionellen Systemen (Leroy et al., 2007; Petersen et al., 2003; Scholte und Lootsma, 1998). Die Vermutung, dass Biokohlen die Ursache für die geringen Populationsdichten sind, kann ausgeschlossen werden, da die Kontrolle zum Teil geringere Populationsdichten als die Biokohlevarianten hatte.

Der Reichtum der Arten (SR) sowie der Shannon-Wiener-Index ( $H'$ ) wurden durch den Jahresgang, d.h. das Pflanzenwachstum, beeinflusst, mit den geringsten Indices im Herbst nach der Ernte und höchsten im späten Frühjahr zum Zeitpunkt des höchsten Pflanzenwachstum und damit verbundener hoher Wurzelexsudation. Die Indices waren im Vergleich zu Ngosong et al. (2009) auf einem ähnlichen Niveau. Der Artenreichtum (SR) reichte dabei von 1.38 bis 2.43 und der Shannon-Wiener-Index ( $H'$ ) von 1.03 bis 1.64. In einer anderen Studie von Kautz et al. (2006) lag der Shannon-Wiener-Index ( $H'$ ) je nach Probenahmetermin zwischen 0.65 und 1.56.

Diese niedrige Diversität der Collembolenfauna an Ackerstandorten ist auf die Störung durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zurückzuführen.

## 6.5 Schlussfolgerungen

Die getesteten Biokohlen zeigten, trotz der unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, Produktionsverfahren und physikalisch-chemischen Eigenschaften, keinen Einfluss auf das Pflanzenwachstum oder Collembolenabundanz im ersten Gefäßversuch. Jedoch führten höhere Applikationsmengen der HTC\_ferm zu Veränderungen. Insbesondere wurden die positiven Effekte der Biokohle auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen durch Collembolen reduziert. Dieses unterstreicht die Bedeutung des faunistischen „grazings“ an Wurzeln. Durch die hohen Standardabweichungen in den Felduntersuchungen ergaben sich geringe Unterschiede zwischen den Behandlungen. Generell konnten keine negativen Effekte der untersuchten Biokohlen auf die Bodenmesofauna nachgewiesen werden. Die Abundanzen der Bodentiere schwankten im Jahresverlauf deutlich. Weitere grundlegende und langfristige Versuche sind notwendig, um direkte Effekte von Biokohlen auf Dichte und Gemeinschaftsstruktur der Collembolen sowie die Wechselwirkungen zwischen Biokohlen und Fauna in Bezug auf das Pflanzenwachstum zu verstehen.

## 7 Bewertung und Schlussfolgerungen

Abschließend wurden die Biokohlen sowie deren Behandlung mit Gärrest und Stickstoffdünger bewertet. Dafür wurde eine Skala von -- bis ++ verwendet, wobei 0 in diesem Fall bedeutete, dass die Biokohle keinen Effekt auf den jeweiligen Parameter hatte. Die Kategorie -- wurde verwendet, wenn gesichert negative Effekte auftraten ( $P \leq 0.05$ ) und ++ bei gesichert positiven Effekten ( $P \leq 0.05$ ). Die Skala sowie deren Bedeutung sind im Folgenden aufgeführt:

-- = gesichert negative Effekte

- = eher negative Effekte

0 = keine Effekte

+ = eher positive Effekte

++ = gesichert positive Effekte

Aufgrund der Zielstellungen der Versuche, bei denen zum Teil die reinen Biokohlen und zum Teil die Biokohlen in Kombination mit Stickstoffdüngung getestet wurden, gliederte sich die Bewertung in folgende Bereiche:

1. Wirkungen von unterschiedlichen Biokohlen in Kombination mit einer praxisüblichen Stickstoffdüngung auf Wachstum, Entwicklung, Ertrag und Qualität von Kulturpflanzen im Feldversuch und in Gefäßversuchen sowie der Mesofauna des Bodens im Feldversuch;
2. Wirkungen unterschiedlicher Biokohlen auf die Spross- und Wurzeltrockenmasse sowie die Wurzelmorphologie und Abundanz von Collembolen in Rhizoboxen und Gefäßversuchen.

Die vorgestellte Bewertungsskala wurde auf den ersten Bereich angewendet, wobei die übergeordneten Parameter bewertet wurden (Tab. 22). Aus den Ergebnissen des Feldversuchs wurden die Daten für die Parzellen mit 100 % N (1. orthogonaler Kern) berücksichtigt (bei den Collembolen alle außer Pyro\_ferm und Pyreg+GR). Im Gefäß wurde mit 1 g N Gefäß<sup>-1</sup> gedüngt. Als Vergleichsmaß wurde jeweils die Kontrolle\_100%N verwendet.

**Tabelle 22:** Bewertung der Einflüsse von Biokohlen auf ausgewählte Parameter der Felduntersuchungen und Gefäßuntersuchungen bei praxisüblicher Stickstoffdüngung. (n.b. nicht bestimmt)

Parameter	Pyro_ 100%N	Pyreg_ 100%N	HTC_ 100%N	Pyro_ferm_ 100%N	HTC_ferm_ 100%N	Pyreg_GR_ 100%N
<b><u>Feldversuch</u></b>						
Bodeneigenschaften	+	+	+	+	+	+ / ++
Wachstum & Entwicklung	0	0	0	0	0	0
Ertrag	0	0	0	0	0	0
Ertragsstruktur	0	0	0	0	0	0
Nährstoffgehalte im Stroh und Korn	+	+	0	+	0	0
Kornqualität	0	0	0	0	0	0
Populationsdichten der Mesofauna	0	0	+	n.b.	0	n.b.
Abundanzen der Collembolen	+	0	+	n.b.	-	n.b.
<b><u>Gefäßversuch</u></b>						
Bodeneigenschaften	+	+	+	+	+	+
Wachstum & Entwicklung	0	0	0	0	0	0
Ertrag	0	0	0	0	0	0
Ertragsstruktur	+	0	0	+	0	0
Nährstoffe und Qualität	0	0	-	0	0	0

Aus Tabelle 22 ist erkennbar, dass die untersuchten Bodeneigenschaften ( $C_t$ ,  $C_{org}$ ,  $N_t$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$ , pH-Wert) sowohl im Gefäßversuch als auch im Feldversuch eher positiv und zum Teil sogar gesichert positiv beeinflusst werden. Wachstum, Entwicklung, Ertrag, Ertragsstruktur und Kornqualität wird durch die untersuchten Biokohlen kaum beeinflusst. Die Nährstoffgehalte im Stroh und Korn von Winterweizen können im Feldversuch positiv beeinflusst werden. Im Gefäßversuch wurden die Nährstoffgehalte des Strohs sowie der Rohproteingehalt der Körner des Sommerweizens allerdings insgesamt kaum durch die Biokohlen beeinflusst mit der Ausnahme des eher negativen Einflusses der HTC-Biokohle. Dieses kann durch die Eigenschaften der HTC-Biokohle erklärt werden (Tab. 1).

In Rhizoboxversuchen sowie in den Gefäßversuchen mit Collembolen wurden die Wirkungen der reinen Biokohlen untersucht. Obwohl der Einsatz der Biokohlen in der Landwirtschaft nicht mit einem Verzicht auf Stickstoffdüngung einhergeht, sind Quantifizierungen der Wirkungen der Biokohlen in diesen Versuchen erforderlich, um

eine eventuelle Toxizität und weitere potenziell negative Effekte zu überprüfen. Deshalb wurden ausgewählte Parameter dieser Versuche ebenfalls mit der beschriebenen Skala bewertet (Tab. 23).

**Tabelle 23:** Bewertung der Einflüsse von Biokohlen auf ausgewählte Parameter der Rhizoboxversuche und Gefäßversuche mit Collembolen. (n.b. nicht bestimmt)

Parameter	Pyro	Pyreg	HTC	Pyro_ferm	HTC_ferm	Pyreg_GR
<b><u>Rhizoboxversuche</u></b>						
Bodeneigenschaften	++	+	+	n.b.	n.b.	n.b.
Sprosstrockenmasse	++	0	++/-	n.b.	n.b.	n.b.
Wurzeltrockenmasse	++	0	0	n.b.	n.b.	n.b.
Wurzelmorphologie	++	+	+/-	n.b.	n.b.	n.b.
<b><u>Gefäßversuche mit Collembolen</u></b>						
Sprosstrockenmasse	0	0	0	n.b.	0/++	n.b.
Wurzeltrockenmasse	0	-	0	n.b.	-/0	n.b.
Abundanz	0	0	0	n.b.	-/--	n.b.
Wurzelmorphologie	++	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tabelle 23 zeigt gesichert positive Effekte der Pyro-Biokohle auf die untersuchten Parameter in den Rhizoboxversuchen. Die Bodeneigenschaften wurden von allen getesteten Biokohlen eher positiv beeinflusst. Die HTC-Biokohle beeinflusste die Sprosstrockenmasse im ersten Versuch (Beginn der Blüte) gesichert positiv und im zweiten Versuch eher negativ, was auf die angewendeten Mengen zurückgeführt werden kann. Im zweiten Versuch (Beginn der Bestockung) wurden höhere Mengen an HTC-Biokohle und der anderen Biokohlen ausgebracht. Die HTC-Biokohle zeigte ebenfalls, je nach ausgebrachter Menge, differenzierte Wirkungen auf die Wurzelmorphologie von Sommerweizen im Gefäßversuch mit eher positiven Einflüssen bei geringer Menge und eher negative Einflüsse bei gesteigerter Biokohlemenge (Tab. 23). In den Gefäßversuchen mit Collembolen gab es kaum Einflüsse der Biokohlen im ersten Versuch. Tendenziell wirkte die HTC\_ferm negativ auf die Collembolen, so dass diese im zweiten Versuch bei unterschiedlichen Mengen getestet wurde. Das führte dazu, dass die Sprosstrockenmasse mit der Zunahme der Biokohlemenge anstieg und die Collembolenabundanz unabhängig von der Menge der HTC\_ferm im zweiten Versuch signifikant geringer war als die Collembolenabundanz der Kontrolle. Im dritten Versuch wurden Collembolen-Biokohle-Interaktionen getestet. Dabei wurde die Wurzelmorphologie von Sommerweizen durch die Pyro-Biokohle ebenfalls verbessert.

In Tabelle 22 und 23 wurde die Sorption von Stickstoff an Biokohlen nicht aufgeführt, da es ein *in vitro* Versuch war, der zur Quantifizierung der Sorption unterschiedlicher Stickstoffquellen an Pyro-Biokohle und HTC-Biokohle diente. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die Pyro-Biokohle als auch die HTC-Biokohle Stickstoff reversibel sorbieren können.

Aus den Tabellen 22 und 23 kann abgeleitet werden, dass die positiven und negativen Effekte der Biokohlen auf den Pflanzenertrag weitestgehend durch die Stickstoffdüngung aufgehoben werden. Unter anderem zeigten Chan et al. (2007) ähnliche Ergebnisse, in denen zusätzlich die Biokohlemenge (0, 10, 50, 100 t ha<sup>-1</sup>) variiert wurde. Die Variante mit 100 t ha<sup>-1</sup> und Stickstoffdüngung zeigte dabei die höchste Trockenmasseproduktion von Radieschen. Des Weiteren lassen sich aus den Tabellen 22 und 23 kaum positive Effekte der Fermentierung der Biokohlen auf die untersuchten Parameter erkennen. Die Annahme, dass die Fermentierung die Eigenschaften der Biokohlen verbessert und diese mit Nährstoffen belädt, kann damit nicht bestätigt werden. Andere Studien zeigten unter anderem positive Effekte bei der Mischung von Kompost mit Biokohlen (Schmidt et al., 2014; Schulz und Glaser, 2012). Die wenig positiven Effekte der fermentierten Biokohlen könnten damit zusammenhängen, dass die Nährstoffe des Gärrestes an der Biokohle sorbiert werden und damit zum Teil nicht für die Pflanzen verfügbar sind.

Die Auswirkungen von Biokohlen auf die Bodenchemie waren bei allen verwendeten Biokohlen positiv. Die C<sub>org</sub>-Gehalte konnten im Feldversuch erhöht werden. Das Ziel, den C<sub>org</sub>-Gehalt des Bodens durch die Anwendung von Biokohlen zu erhöhen, wurde somit erreicht. Außerdem gibt es, wie im Gefäßversuch untersucht, nach vier aufeinanderfolgenden Kulturen (Sommerweizen-Sommergerste-Sommerraps-Mais) im gleichen Boden bzw. Boden-Biokohle Gemisch positive Effekte auf C<sub>org</sub>, K<sub>DL</sub> und den pH-Wert.

Eine Empfehlung der Ausbringung der untersuchten Biokohlen auf dem Feld lässt sich nur geben, wenn die Ziele der Anwendung von Biokohlen klar definiert sind. Von Landwirten verfolgte übergeordnete Ziele mit Relevanz für die in dieser Studie untersuchten Parameter (Tab. 22, 23) beziehen sich vor allem auf den Ertrag sowie den Boden. Die Erträge können zumindest kurzfristig durch die untersuchten Biokohlen nicht verbessert werden. Bei Preisen für die Biokohlen von etwa 1.10 € kg<sup>-1</sup> für die Pyreg-Biokohle und etwa 10 € kg<sup>-1</sup> für die HTC-Biokohle (die



anderen Preise sind unbekannt; alle verwendeten Biokohlen sind nicht im kommerziellen Handel verfügbar) und Ausbringungsmengen von  $18.7 \text{ t ha}^{-1}$  Frischmasse (Pyreg-Biokohle),  $10.9 \text{ t ha}^{-1}$  Frischmasse (Pyro-Biokohle) und  $26.6 \text{ t ha}^{-1}$  Frischmasse (HTC-Biokohle) ist derzeit eine Anwendung von den in dieser Studie untersuchten Biokohlen zur Erhöhung der Erträge nicht zu empfehlen.

Dieser Aussage müssen allerdings die zumindest kurzfristigen positiven Auswirkungen auf die chemischen Bodeneigenschaften entgegen gestellt werden. In der vorliegenden Studie wirkten alle getesteten Biokohlen eher positiv auf die Bodenchemie. Nennenswerte negative Effekte auf die Collembolen als Vertreter der Mesofauna durch die Anwendung der Biokohlen im Boden wurden nicht nachgewiesen. Andere Studien zeigten ähnliche Ergebnisse auf Collembolen und Regenwürmer (Domene et al., 2014; Van Zwieten et al., 2010).

Unter anderem auf den Sandböden Brandenburgs sind die Ziele der Landwirte neben adäquaten Erträgen, die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit. Eine langfristige Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehaltes wäre dabei ein wichtiges Ziel. In der vorliegenden Studie konnten durch die Anwendung von Biokohlen kurzfristige Erhöhungen erreicht werden. Die Studie von Tammeorg et al. (2014) zeigte, dass die Bodenkohlenstoffgehalte in einem dreijährigen Versuch durch die Anwendung von  $10 \text{ t ha}^{-1}$  (TM) Biokohle in allen drei Jahren nach der Ausbringung erhöht waren. Die Menge von  $10 \text{ t ha}^{-1}$  trockener Biokohle ist in etwa mit der in der vorliegenden Studie im Feld ausgebrachten Menge vergleichbar ( $9\text{-}14 \text{ t ha}^{-1}$  TM), so dass eine mittelfristige Erhöhung der Kohlenstoffgehalte der Böden durch die Anwendung von Biokohlen nicht ausgeschlossen werden kann. Karhu et al. (2011) berichteten von einer Erhöhung der Wasserhaltekapazität durch Biokohle, was ebenfalls positiv für die Sandböden in Brandenburg wäre.

Ein weiteres Ziel der Anwendung von Biokohlen in Bezug auf den Klimawandel ist die C-Sequestrierung. Biokohlen mit hohen Kohlenstoffgehalten werden im Boden angewendet und der Kohlenstoff damit langfristig gespeichert. Lorenz und Lal (2014) kommen nach ihrer Literaturstudie zu dem Schluss, dass Biokohle mit der C-Sequestrierung in tieferen Bodenschichten einen sinnvollen Beitrag für die Abschwächung des Klimawandels leisten könnte.

Die Tabellen 22 und 23 bestätigen die Aussage, dass „Biokohle nicht gleich Biokohle“ ist. Je nach Ausgangsmaterialien, Produktionsprozess,

Prozessbedingungen und Ausbringungsmengen sowie Kombinationen mit organischen Stoffen (z.B. Kompost, Gärrest) unterscheiden sich die Eigenschaften und Wirkungen der Biokohlen sehr stark. Außerdem variieren die Böden und Bodeneigenschaften, bei denen Biokohlen in der bisherigen Forschung angewendet wurde, sehr stark. Bei fruchtbaren Böden kann auf die Anwendung der Biokohlen zur Bodenverbesserung und Erhöhung der Erträge verzichtet werden. Aufgrund der Variationen der Biokohlen wurden und werden von mehreren Organisationen (u.a. International Biochar Initiative, European Biochar Research Network) Zertifikate erstellt, bei denen Grenzwerte für die Biokohleeigenschaften (C, N, PAKs,...) festgelegt werden.

Generell lässt sich ableiten, dass die Anwendung von Biokohlen im Boden sorgfältig durchdacht werden muss. Die nicht nachweisbaren Ertragseffekte stehen den durchaus positiven Wirkungen der Biokohlen auf die bodenchemischen Eigenschaften gegenüber. Da ein vorrangiges Ziel von Landwirten in der Regel die Sicherung hoher Erträge von Kulturpflanzen ist, werden Landwirte keine Biokohlen einsetzen, wenn positive Ertragseffekte ausbleiben. Außerdem muss aufgrund der Unterschiede in den Eigenschaften der Biokohlen das auszubringende Material hinreichend geprüft werden, denn Biokohle kann nicht vom Acker wieder entfernt werden, wenn sie einmal ausgebracht wurde. Es sind noch keine homogenen Biokohlen verfügbar, die zur Ausbringung auf dem Acker empfohlen werden können. Deshalb ist weitere Forschung notwendig, um Biokohlen zu entwickeln, die sowohl positive Effekte auf den Ertrag von Kulturpflanzen als auf die Bodeneigenschaften von sandigen Böden haben.

## Literaturverzeichnis

- Alburquerque, J., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M.d., Gallardo, A., Villar, R., 2013. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 475-484.
- Aldag, R., Kickuth, R., 1973. Stickstoffverbindungen in Böden und ihre Beziehung zur Humusdynamik 1. Mitteilung: Fraktionierung und Bilanzierung der Amino Zucker und der Aminosäuren -in den Ah-Horizonten einer Rendsina und vier Sauer-Braunerden des Göttinger Waldes. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 136, 193-202.
- Anderson, C.R., Condron, L.M., Clough, T.J., Fiers, M., Stewart, A., Hill, R.A., Sherlock, R.R., 2011. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia* 54, 309-320.
- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., Horie, T., 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research* 111, 81-84.
- Bährmann, R., 1995. Bestimmung wirbelloser Tiere. Gustav Fischer, Jena.
- Bardgett, R.D., Whittaker, J.B., Frankland, J.C., 1993. The effect of collembolan grazing on fungal activity in differently managed upland pastures: A microcosm study. *Biology and Fertility of Soils* 16, 255-262.
- Bargmann, I., Martens, R., Rillig, M.C., Kruse, A., Kücke, M., 2014a. Hydrochar amendment promotes microbial immobilization of mineral nitrogen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 59-67.
- Bargmann, I., Rillig, M.C., Kruse, A., Greef, J.-M., Kücke, M., 2014b. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 48-58.
- Bargmann, I., Rillig, M.C., Kruse, A., Greef, J.-M., Kücke, M., 2014c. Initial and subsequent effects of hydrochar amendment on germination and nitrogen uptake of spring barley. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 68-74.
- Baronti, S., Alberti, G., Delle Vedove, G., Di Gennaro, F., Fellet, G., Genesio, L., Miglietta, F., Peressotti, A., Vaccari, F.P., 2010. The Biochar Option to Improve Plant Yields: First Results From Some Field and Pot Experiments in Italy. *Italian Journal of Agronomy* 5.
- Biederman, L.A., Harpole, W.S., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* 5, 202-214.
- Blackwell, P., Krull, E., Butler, G., Herbert, A., Solaiman, Z., 2010. Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertiliser use in south-western Australia: an agronomic and economic perspective. *Soil Research* 48, 531-545.
- Blackwell, P., Riethmüller, G., Collins, M., 2009. Biochar application to soil. *Biochar for environmental management: science and technology*, 207-226.
- Boerner, R.E.J., Harris, K., 1991. Effects of collembola (arthropoda) and relative germination date on competition between mycorrhizal *Panicum virgatum* (Poaceae) and non-mycorrhizal *Brassica nigra* (Brassicaceae). *Plant and Soil* 136, 121-129.

- Brennan, A., Jiménez, E.M., Puschenreiter, M., Alburquerque, J., Switzer, C., 2014. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. *Plant and Soil* 379, 351-360.
- Bruun, E.W., Ambus, P., Egsgaard, H., Hauggaard-Nielsen, H., 2012. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* 46, 73-79.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research* 45, 629-634.
- Chan, K.Y., Xu, Z., 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. *Biochar for environmental management: science and technology*, 67-84.
- Chen, B., Snider, R., Snider, R., 1995. Food preference and effects of food type on the life history of some soil Collembola. *Pedobiologia* 39, 496-505.
- Cole, L., Dromph, K., Boaglio, V., Bardgett, R., 2004a. Effect of density and species richness of soil mesofauna on nutrient mineralisation and plant growth. *Biology and Fertility of Soils* 39, 337-343.
- Cole, L., Staddon, P.L., Sleep, D., Bardgett, R.D., 2004b. Soil animals influence microbial abundance, but not plant-microbial competition for soil organic nitrogen. *Functional Ecology* 18, 631-640.
- Domene, X., Mattana, S., Hanley, K., Enders, A., Lehmann, J., 2014. Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry* 72, 152-162.
- DSV, 2014. Akteur. [www.dsv-saaten.de/getreide/winterweizen/sorten/akteur.html](http://www.dsv-saaten.de/getreide/winterweizen/sorten/akteur.html).
- DWD, 2014. Fallzahl- Backqualität von Weizen und Roggen. [www.dwd.de/bvbw/generator/.../Content/.../Fallzahl.../Fallzahl.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/.../Content/.../Fallzahl.../Fallzahl.pdf).
- Endlweber, K., Ruess, L., Scheu, S., 2009. Collembola switch diet in presence of plant roots thereby functioning as herbivores. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1151-1154.
- Endlweber, K., Scheu, S., 2006. Effects of Collembola on root properties of two competing ruderal plant species. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 2025-2031.
- Endlweber, K., Scheu, S., 2007. Interactions between mycorrhizal fungi and Collembola: effects on root structure of competing plant species. *Biology and Fertility of Soils* 43, 741-749.
- Faust, H., Bornhak, H., Hirschberg, K., Jung, K., Junghans, P., Krumbiegel, P., 1981. <sup>15</sup>N-Anwendungen in der Biochemie, Landwirtschaft und Medizin. Isocommerz Schriftenreihe 5.
- Friedel, J.K., Scheller, E., 2002. Composition of hydrolysable amino acids in soil organic matter and soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 315-325.
- Fuertes, A.B., Arbestain, M.C., Sevilla, M., Maciá-Agulló, J.A., Fiol, S., López, R., Smernik, R.J., Aitkenhead, W.P., Arce, F., Macías, F., 2010. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover. *Soil Research* 48, 618-626.
- Gajić, A., Koch, H.-J., 2012. Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Growth Reduction Caused by Hydrochar Is Related to Nitrogen Supply. *J. Environ. Qual.* 41, 1067-1075.
- Gisin, H., 1960. Collembolenfauna Europas. Museum d'histoire naturelle, Genf.

- Golldack, J., Augustin, C., Lentzsch, P., Werner, A., 2004. Pathozones of genetic subtypes of *Gaeumannomyces graminis* in cereals. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 145-154.
- Guerena, D., Lehmann, J., Hanley, K., Enders, A., Hyland, C., Riha, S., 2013. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant and Soil* 365, 239-254.
- Gunes, A., Inal, A., Taskin, M.B., Sahin, O., Kaya, E.C., Atakol, A., 2014. Effect of phosphorus-enriched biochar and poultry manure on growth and mineral composition of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv.) grown in alkaline soil. *Soil Use and Management* 30, 182-188.
- Gurwick, N.P., Moore, L.A., Kelly, C., Elias, P., 2013. A Systematic Review of Biochar Research, with a Focus on Its Stability *in situ* and Its Promise as a Climate Mitigation Strategy. *PLoS One* 8, e75932.
- Haubert, D., Birkhofer, K., Fließbach, A., Gehre, M., Scheu, S., Ruess, L., 2009. Trophic structure and major trophic links in conventional versus organic farming systems as indicated by carbon stable isotope ratios of fatty acids. *Oikos* 118, 1579-1589.
- Hopkin, S.P., 1997. *Biology of the Springtails : (Insecta: Collembola): (Insecta: Collembola)*. OUP Oxford.
- Hopkin, S.P., 2007. *A key to the Collembola (springtails) of Britain and Ireland*. FSC Publications.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144, 175-187.
- Jones, D.L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T.H., Murphy, D.V., 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry* 45, 113-124.
- Joseph, S., Graber, E., Chia, C., Munroe, P., Donne, S., Thomas, T., Nielsen, S., Marjo, C., Rutledge, H., Pan, G., 2013. Shifting paradigms: development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components. *Carbon Management* 4, 323-343.
- Kaiser, P.A., Lussenhop, J., 1991. Collembolan effects on establishment of vesicular-arbuscular mycorrhizae in soybean (*Glycine max*). *Soil Biology and Biochemistry* 23, 307-308.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., Regina, K., 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140, 309-313.
- Kautz, T., 2004. *Bodenökologische Wirkungen differenzierter organisch-mineralischer Düngung an verschiedenen Standorten*. Dissertation.
- Kautz, T., López-Fando, C., Ellmer, F., 2006. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain. *Applied Soil Ecology* 33, 278-285.
- Kempson, D., 1962. A new extractor for woodland litter. *Pedobiologia* 3, 1-21.
- Klironomos, J., Kendrick, B., 1995. Relationships among microarthropods, fungi, and their environment, In: Collins, H.P., Robertson, G.P., Klug, M.J. (Eds.), *The Significance and Regulation of Soil Biodiversity*. Springer Netherlands, pp. 209-223.

- Laird, D.A., Brown, R.C., Amonette, J.E., Lehmann, J., 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 3, 547-562.
- LeCroy, C., Masiello, C.A., Rudgers, J.A., Hockaday, W.C., Silberg, J.J., 2013. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface. *Soil Biology and Biochemistry* 58, 248-254.
- Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M., 2006. Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, 395-419.
- Lehmann, J., Joseph, S., 2009. Biochar for environmental management: an introduction, In: Lehmann, J., Joseph, S. (Ed.), *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan, London, pp. 1-12.
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Jr., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B., 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249, 343-357.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D., 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1812-1836.
- Leroy, B.L.M.M., Bommele, L., Reheul, D., Moens, M., De Neve, S., 2007. The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture: Effects on soil fauna and yield. *European Journal of Soil Biology* 43, 91-100.
- Libra, J.A., Ro, K.S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.-H., 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels* 2, 71-106.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B., Glaser, B., 2012. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175, 698-707.
- Lorenz, K., Lal, R., 2014. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 651-670.
- Macfadyen, A., 1953. Notes on Methods for the Extraction of Small Soil Arthropods. *Journal of Animal Ecology* 22, 65-77.
- MacGregor, J.M., Taskovitch, L.T., Martin, W.P., 1961. Effect of Nitrogen Fertilizer and Soil Type on the Amino Acid Content of Corn Grain<sup>1</sup>. *Agron. J.* 53, 211-214.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S., Lehmann, J., 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333, 117-128.
- Makoto, K., Tamai, Y., Kim, Y.S., Koike, T., 2010. Buried charcoal layer and ectomycorrhizae cooperatively promote the growth of *Larix gmelinii* seedlings. *Plant and Soil* 327, 143-152.
- Marks, E.A.N., Mattana, S., Alcañiz, J.M., Domene, X., 2014. Biochars provoke diverse soil mesofauna reproductive responses in laboratory bioassays. *European Journal of Soil Biology* 60, 104-111.

- Meier, U., 1997. Growth stages of Mono- and Dicotyledonous plants. BBCH-Monograph, Blackwell, Berlin, 622.
- Mengel, K., Kirkby, E., 1982. Principles of plant nutrition Intl. Potash Inst, Bern, Switzerland.
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 2001. Principles of Plant Nutrition, 5th ed. Kluwer Academic Publishers, p. 57.
- Mitchell, R.A.C., Mitchell, V.J., Driscoll, S.P., Franklin, J., Lawlor, D.W., 1993. Effects of increased CO<sub>2</sub> concentration and temperature on growth and yield of winter wheat at two levels of nitrogen application. *Plant, Cell & Environment* 16, 521-529.
- Mohan, D., Pittman, C.U., Steele, P.H., 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels* 20, 848-889.
- Mosier, A., Bleken, M., Chaiwanakupt, P., Ellis, E., Freney, J., Howarth, R., Matson, P., Minami, K., Naylor, R., Weeks, K., Zhu, Z., 2001. Policy implications of humus-accelerated nitrogen cycling. *Biogeochemistry* 52, 281-320.
- Mumme, J., Diakité, M., 2013. Char materials, p. 4.
- Neumann, G., George, T., Plassard, C., 2009. Strategies and methods for studying the rhizosphere—the plant science toolbox. *Plant and Soil* 321, 431-456.
- Ngosong, C., Gabriel, E., Ruess, L., 2014. Collembola grazing on arbuscular mycorrhiza fungi modulates nutrient allocation in plants. *Pedobiologia* 57, 171-179.
- Ngosong, C., Raupp, J., Scheu, S., Ruess, L., 2009. Low importance for a fungal based food web in arable soils under mineral and organic fertilization indicated by Collembola grazers. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 2308-2317.
- Noguera, D., Barot, S., Laossi, K.R., Cardoso, J., Lavelle, P., Cruz de Carvalho, M.H., 2012. Biochar but not earthworms enhances rice growth through increased protein turnover. *Soil Biology and Biochemistry* 52, 13-20.
- Noguera, D., Rondón, M., Laossi, K.-R., Hoyos, V., Lavelle, P., Cruz de Carvalho, M.H., Barot, S., 2010. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 1017-1027.
- Ozturk, A., Caglar, O., Sahin, F., 2003. Yield response of wheat and barley to inoculation of plant growth promoting rhizobacteria at various levels of nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, 262-266.
- Perten, H., 1964. Application of the falling number method for evaluating alpha-amylase activity. *Cereal Chem* 41, 127-140.
- Petersen, S.O., Henriksen, K., Mortensen, G.K., Krogh, P.H., Brandt, K.K., Sørensen, J., Madsen, T., Petersen, J., Grøn, C., 2003. Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. *Soil and Tillage Research* 72, 139-152.
- Pielou, E., 1971. *An Introduction to Mathematical Ecology*. Wiley, New York (1971).
- Piepho, H.-P., 2012. A SAS macro for generating letter displays of pairwise mean comparisons. *Communications in Biometry and Crop Science* 7, 4-13.
- Pierzynski, G.M., Sims, J.T., Vance, G.F., 1994. *Soils and environmental quality*. Lewis Publishers, Boca Raton.

- Prendergast-Miller, M.T., Duvall, M., Sohi, S.P., 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 2243-2246.
- Prendergast-Miller, M.T., Duvall, M., Sohi, S.P., 2014. Biochar–root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European Journal of Soil Science* 65, 173-185.
- Quilliam, R.S., Glanville, H.C., Wade, S.C., Jones, D.L., 2013. Life in the 'charosphere' – Does biochar in agricultural soil provide a significant habitat for microorganisms? *Soil Biology and Biochemistry* 65, 287-293.
- Raiffeisen, 2014. Ackermanager-Weizen.  
[http://www.raiffeisen.com/pflanzen/ackermanager/weizen\\_html](http://www.raiffeisen.com/pflanzen/ackermanager/weizen_html).
- Reddy, G.K., Nagender, T., Yerasi, P.K.R., 2013. Biochar and its potential benefits - a review. *Environment and Ecology* 31, 2000-2005.
- Reverchon, F., Flicker, R., Yang, H., Yan, G., Xu, Z., Chen, C., Hosseini Bai, S., Zhang, D., 2014. Changes in  $\delta^{15}\text{N}$  in a soil–plant system under different biochar feedstocks and application rates. *Biology and Fertility of Soils* 50, 275-283.
- Rillig, M.C., Wagner, M., Salem, M., Antunes, P.M., George, C., Ramke, H.-G., Titirici, M.-M., Antonietti, M., 2010. Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. *Applied Soil Ecology* 45, 238-242.
- Salem, M., Kohler, J., Rillig, M.C., 2013a. Palatability of carbonized materials to Collembola. *Applied Soil Ecology* 64, 63-69.
- Salem, M., Kohler, J., Wurst, S., Rillig, M.C., 2013b. Earthworms can modify effects of hydrochar on growth of *Plantago lanceolata* and performance of arbuscular mycorrhizal fungi. *Pedobiologia* 56, 219-224.
- Scheu, S., Theenhaus, A., Jones, T.H., 1999. Links between the detritivore and the herbivore system: effects of earthworms and Collembola on plant growth and aphid development. *Oecologia* 119, 541-551.
- Schilling, G., 2000. *Pflanzenernährung und Düngung*. Ulmer.
- Schmidt, E.L., 1982. Nitrification in Soil, In: Stevenson, F.J. (Ed.), *Nitrogen in Agricultural Soils*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, pp. 253-288.
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M.W.H., Mackie, K.A., Abiven, S., 2014. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191, 117-123.
- Schmorl, K., 1937. Das Hektolitergewicht des Getreides als Wertmaßstab für dessen Güte. *Zeitschrift für Untersuchung der Lebensmittel* 74, 26-31.
- Scholte, K., Lootsma, M., 1998. Effect of farmyard manure and green manure crops on populations of mycophagous soil fauna and *Rhizoctonia* stem canker of potato. *Pedobiologia* 42, 223-231.
- Schuchardt, F., Vorlop, K.-D., 2010. Abschätzung des Aufkommens an Kohlenstoff in Biomasse-Reststoffen in Deutschland für eine Verwertung über Hydrothermale Carbonisierung (HTC) und Einbringung von HTC-Kohle in den Boden. *Landbauforschung* 60, 205-212.



- Schulz, H., Glaser, B., 2012. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175, 410-422.
- Senwo, Z.N., Tabatabai, M.A., 1998. Amino acid composition of soil organic matter. *Biology and Fertility of Soils* 26, 235-242.
- Sevilla, M., Fuertes, A.B., 2009. Chemical and Structural Properties of Carbonaceous Products Obtained by Hydrothermal Carbonization of Saccharides. *Chemistry – A European Journal* 15, 4195-4203.
- Sevilla, M., Fuertes, A.B., Rokaya, M., 2011. High density hydrogen storage in superactivated carbons from hydrothermally carbonized renewable organic materials. *Energy Environ. Sci.* 11, 1400-1410.
- Singh, B., Singh, B.P., Cowie, A.L., 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Soil Research* 48, 516-525.
- Singh Gahoonia, T., Care, D., Nielsen, N., 1997. Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant and Soil* 191, 181-188.
- Steiner, C., Teixeira, W., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J., Blum, W.H., Zech, W., 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291, 275-290.
- Stevenson, F.J., 1982. Organic Forms of Soil Nitrogen, In: Stevenson, F.J. (Ed.), *Nitrogen in Agricultural Soils*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, pp. 67-122.
- Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., Chen, H., Yang, L., 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal* 240, 574-578.
- Tagoe, S., Horiuchi, T., Matsui, T., 2008. Effects of carbonized and dried chicken manures on the growth, yield, and N content of soybean. *Plant and Soil* 306, 211-220.
- Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P., Stoddard, F., Alakukku, L., Helenius, J., 2014. Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. *Plant and Soil* 374, 89-107.
- Terman, G.L., Ramig, R.E., Dreier, A.F., Olson, R.A., 1969. Yield-Protein Relationships in Wheat Grain, as Affected by Nitrogen and Water. *Agron. J.* 61, 755-759.
- Theenhaus, A., Scheu, S., Schaefer, M., 1999. Contramensal interactions between two collembolan species: effects on population development and on soil processes. *Functional Ecology* 13, 238-246.
- Titirici, M.M., Thomas, A., Antonietti, M., 2007. Back in the black: Hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO<sub>2</sub> problem. *New J Chem* 31, 787-789.
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., Nishihara, E., 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management* 27, 205-212.
- Vaccari, F.P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F., Miglietta, F., 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy* 34, 231-238.

- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A., 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327, 235-246.
- VDLUFA, 1997a. Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA, 1997b. VDLUFA – Methodenbuch I A 6.2.1.2, Phosphor und Kalium im DL-Auszug. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA, 1999. Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Richtwerte für die Gehaltsklasse C. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Visser, S., Parkinson, D., Hassall, M., 1987. Fungi associated with *Onychiurus subtenuis* (Collembola) in an aspen woodland. *Canadian Journal of Botany* 65, 635-642.
- Wellie-Stephan, O., 2011. Die Fallzahl- ein komplexes Merkmal. <https://www.dsv-saaten.de/export/sites/dsv-saaten.../fallzahl-3-11.pdf>, 1-2.
- Wu, H., Yip, K., Kong, Z., Li, C.-Z., Liu, D., Yu, Y., Gao, X., 2011. Removal and Recycling of Inherent Inorganic Nutrient Species in Mallee Biomass and Derived Biochars by Water Leaching. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50, 12143-12151.
- Wutzke, K., Heine, W., Drescher, U., Richter, I., Plath, C., 1983. <sup>15</sup>N-labelled yeast protein - A valid tracer for calculating whole-body protein parameters in infants: A comparison between [<sup>15</sup>N]-yeast protein and [<sup>15</sup>N]-glycine. *Hum Nutr Clin Nutr* 37C, 317-327.
- YARA, 2014. Steigerung des Hektolitergewichts bei Weizen. <http://www.yara.de/crop-nutrition/crops/wheat/crop-nutrition/wheat-quality/increasing-specific-weight/>.
- Yeates, G., Bird, A., 1994. Some observations on the influence of agricultural practice on nematode faunae of some south Australian soils. *Fundamental and Applied Nematological Research* 17, 185-196.
- Zabel, S., 1965. Grundlegende Betrachtung zur Weizenqualitätsbestimmung mit Hilfe des Sedimentationswertes nach ZELENY. *Food / Nahrung* 9, 469-480.
- Zhang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Inyang, M., 2012. Synthesis of porous MgO-biochar nanocomposites for removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal* 210, 26-32.
- Zoon, F.C., Tienderen, P.H., 1990. A rapid quantitative measurement of root length and root branching by microcomputer image analysis. *Plant and Soil* 126, 301-308.

## Anhang

### Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

<b>Abbildung A1:</b> Anlageplan des Feldversuchs.....	115
---	-----

### Verzeichnis der Tabellen im Anhang

<b>Tabelle A1:</b> Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte Weizenstroh und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Gärrest und Interaktionen des ersten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.....	116
--	-----

<b>Tabelle A2:</b> Fallzahl, Sedimentationswert und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Gärrest und Interaktionen des ersten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.....	117
---	-----

<b>Tabelle A3:</b> Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte Weizenstroh und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Stickstoff und Interaktionen des zweiten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.....	118
--	-----

<b>Tabelle A4:</b> Nährstoffgehalte Weizenkorn, Rohproteingehalt und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Stickstoff und Interaktionen des zweiten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.....	119
--	-----

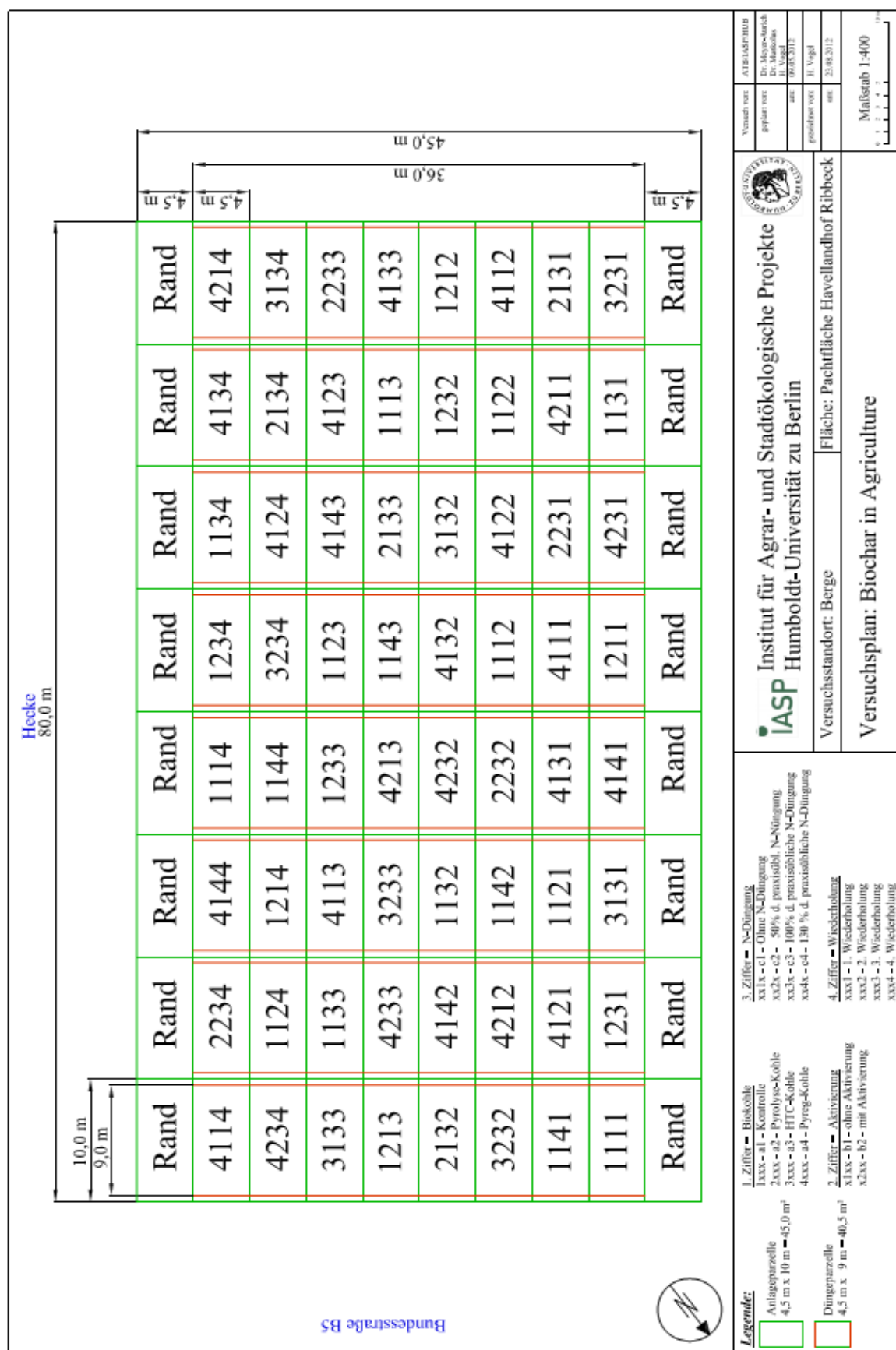
<b>Tabelle A5:</b> Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte Weizenstroh und die P-Werte für die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff und Interaktionen des dritten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; BC = Biokohle; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.....	120
--	-----

<b>Tabelle A6:</b> Nährstoffgehalte Weizenkorn, Rohproteingehalte und die P-Werte für die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff und Interaktionen des dritten orthogonalen Kerns. Mittelwerte $\pm$ SD; BC = Biokohle; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.....	121
---	-----

<b>Tabelle A7:</b> Artenstruktur bzw. Gattungen der gefundenen Bodentiere der ersten Probenahme (6. März 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben ist die Abundanz der Arten (Individuen $m^{-2}$ ) (O.- Ordnung; U.O.- Unterordnung; K.- Klasse; F.- Familie).....	122
---	-----

<b>Tabelle A8:</b> Artenstruktur bzw. Gattungen der gefundenen Bodentiere der zweiten Probenahme (28. April 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben ist die Abundanz der Arten (Individuen $m^{-2}$ ) (O.- Ordnung; U.O.- Unterordnung; K.- Klasse; F.- Familie).....	123
--	-----

<b>Tabelle A9:</b> Artenstruktur bzw. Gattungen der gefundenen Bodentiere der dritten Probenahme (23. Oktober 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben ist die Abundanz der Arten (Individuen $m^{-2}$ ) (O.- Ordnung; U.O.- Unterordnung; K.- Klasse; F.- Familie).....	124
--	-----



### Abbildung A1: Anlageplan des Feldversuchs

**Tabelle A1:** Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte Weizenstroh und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Gärrest und Interaktionen des ersten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung	Ähren m <sup>-2</sup>	Körner Ähre <sup>-1</sup>	Tausendkorn- gewicht (g)	Hektoliter- gewicht (kg hl <sup>-1</sup> )	N <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	
K_100%N	481.48±69.11 <sup>a</sup>	35.12±3.11 <sup>a</sup>	46.23±1.64 <sup>a</sup>	80.09±0.47 <sup>a</sup>	0.40±0.11 <sup>a</sup>	0.66±0.16 <sup>a</sup>	0.64±0.08 <sup>a</sup>	
K_GR_100%N	425.15±41.13 <sup>a</sup>	40.65±3.57 <sup>a</sup>	46.99±1.43 <sup>a</sup>	80.35±0.32 <sup>a</sup>	0.43±0.08 <sup>a</sup>	0.72±0.17 <sup>a</sup>	0.64±0.06 <sup>a</sup>	
Pyro_100%N	454.48±45.94 <sup>a</sup>	35.28±2.75 <sup>a</sup>	47.42±0.29 <sup>a</sup>	79.97±0.09 <sup>a</sup>	0.39±0.04 <sup>a</sup>	0.64±0.07 <sup>a</sup>	0.67±0.08 <sup>a</sup>	
Pyro_ferm_100%N	493.06±97.55 <sup>a</sup>	28.55±7.78 <sup>a</sup>	46.92±1.07 <sup>a</sup>	79.99±0.58 <sup>a</sup>	0.39±0.04 <sup>a</sup>	0.77±0.14 <sup>a</sup>	0.65±0.08 <sup>a</sup>	
HTC_100%N	507.72±96.87 <sup>a</sup>	29.93±3.61 <sup>a</sup>	47.20±1.21 <sup>a</sup>	80.20±0.16 <sup>a</sup>	0.36±0.09 <sup>a</sup>	0.67±0.24 <sup>a</sup>	0.62±0.09 <sup>a</sup>	
HTC_ferm_100%N	500.00±58.51 <sup>a</sup>	33.12±3.63 <sup>a</sup>	47.13±1.21 <sup>a</sup>	80.09±0.16 <sup>a</sup>	0.35±0.04 <sup>a</sup>	0.66±0.07 <sup>a</sup>	0.63±0.07 <sup>a</sup>	
Pyreg_100%N	472.99±110.03 <sup>a</sup>	36.78±7.87 <sup>a</sup>	46.10±0.78 <sup>a</sup>	79.98±0.13 <sup>a</sup>	0.37±0.03 <sup>a</sup>	0.61±0.16 <sup>a</sup>	0.66±0.11 <sup>a</sup>	
Pyreg_GR_100%N	481.48±44.37 <sup>a</sup>	34.79±5.02 <sup>a</sup>	46.64±1.29 <sup>a</sup>	80.20±0.47 <sup>a</sup>	0.41±0.06 <sup>a</sup>	0.78±0.25 <sup>a</sup>	0.64±0.09 <sup>a</sup>	
df				P-Werte				
Biokohle	3	0.595	0.068	0.226	0.438	0.364	0.943	0.775
Gärrest	1	0.871	0.998	0.587	0.348	0.539	0.112	0.658
Biokohle* Gärrest	3	0.629	0.121	0.509	0.545	0.889	0.601	0.951

**Tabelle A2:** Fallzahl, Sedimentationswert und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Gärrest und Interaktionen des ersten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung	Fallzahl (sec)	Sedimentationswert (ml)
K_100%N	429.50 $\pm$ 21.93a	13.75 $\pm$ 0.65a
K_GR_100%N	442.88 $\pm$ 27.55a	14.31 $\pm$ 0.38a
Pyro_100%N	435.63 $\pm$ 18.97a	14.69 $\pm$ 0.24a
Pyro_ferm_100%N	436.63 $\pm$ 9.81a	14.31 $\pm$ 0.55a
HTC_100%N	444.88 $\pm$ 14.72a	14.50 $\pm$ 0.74a
HTC_ferm_100%N	438.25 $\pm$ 13.23a	14.13 $\pm$ 0.48a
Pyreg_100%N	443.38 $\pm$ 14.92a	14.19 $\pm$ 0.55a
Pyreg_GR_100%N	465.38 $\pm$ 13.24a	14.75 $\pm$ 0.54a
	df	P-Werte
Biokohle	3	0.138
Gärrest	1	0.229
Biokohle*	3	0.362
Gärrest		0.152

**Tabelle A3:** Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte Weizenstroh und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Stickstoff und Interaktionen des zweiten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung	Ähren m <sup>-2</sup>	Körner Ähre <sup>-1</sup>	Tausendkorn- gewicht (g)	Hektoliter- gewicht (kg hl <sup>-1</sup> )	N <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	K <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	
Kontrolle	391.20±20.99 <sup>b</sup>	18.66±7.37 <sup>b</sup>	45.34±0.53 <sup>a</sup>	78.98±0.65 <sup>a</sup>	0.26±0.02 <sup>c</sup>	0.95±0.08 <sup>a</sup>	6.84±0.18 <sup>b</sup>	0.81±0.08 <sup>a</sup>	
Pyreg	386.57±49.60 <sup>b</sup>	18.55±7.76 <sup>b</sup>	45.12±0.87 <sup>a</sup>	78.94±0.66 <sup>a</sup>	0.28±0.04 <sup>bc</sup>	0.96±0.04 <sup>a</sup>	7.58±0.61 <sup>ab</sup>	0.73±0.06 <sup>ab</sup>	
K_50%N	452.93±61.75 <sup>ab</sup>	29.77±4.90 <sup>ab</sup>	46.50±0.93 <sup>a</sup>	79.46±0.27 <sup>a</sup>	0.30±0.02 <sup>bc</sup>	0.58±0.05 <sup>b</sup>	7.46±0.54 <sup>ab</sup>	0.64±0.08 <sup>b</sup>	
Pyreg_50%N	432.87±32.01 <sup>ab</sup>	32.76±3.28 <sup>ab</sup>	47.30±0.83 <sup>a</sup>	79.49±0.35 <sup>a</sup>	0.28±0.02 <sup>bc</sup>	0.57±0.11 <sup>b</sup>	6.80±0.78 <sup>b</sup>	0.63±0.08 <sup>b</sup>	
K_100%N	481.48±69.11 <sup>ab</sup>	35.12±3.11 <sup>a</sup>	46.23±1.64 <sup>a</sup>	80.09±0.47 <sup>a</sup>	0.40±0.11 <sup>ab</sup>	0.66±0.16 <sup>b</sup>	7.75±0.37 <sup>ab</sup>	0.64±0.08 <sup>b</sup>	
Pyreg_100%N	472.99±110.03 <sup>ab</sup>	36.78±7.87 <sup>a</sup>	46.10±0.78 <sup>a</sup>	79.98±0.13 <sup>a</sup>	0.37±0.03 <sup>ab</sup>	0.61±0.16 <sup>b</sup>	7.86±0.77 <sup>ab</sup>	0.66±0.11 <sup>b</sup>	
K_130%N	516.98±45.47 <sup>a</sup>	33.79±0.73 <sup>a</sup>	45.70±2.04 <sup>a</sup>	79.96±0.52 <sup>a</sup>	0.43±0.06 <sup>a</sup>	0.68±0.06 <sup>b</sup>	8.74±0.88 <sup>a</sup>	0.64±0.04 <sup>b</sup>	
Pyreg_130%N	532.41±67.17 <sup>a</sup>	27.44±13.29 <sup>ab</sup>	45.24±1.83 <sup>a</sup>	79.47±1.29 <sup>a</sup>	0.46±0.05 <sup>a</sup>	0.77±0.10 <sup>ab</sup>	8.68±0.98 <sup>a</sup>	0.71±0.05 <sup>ab</sup>	
	df		P-Werte						
Biokohle	1	0.81	0.832	0.996	0.409	0.931	0.749	0.896	0.914
Stickstoff	3	<0.001	<0.001	0.024	0.002	<0.001	<0.001	0.001	<0.001
Biokohle* Stickstoff	3	0.919	0.44	0.676	0.728	0.369	0.508	0.307	0.093

**Tabelle A4:** Nährstoffgehalte Weizenkorn, Rohproteingehalt und die P-Werte für die Faktoren Biokohle und Stickstoff und Interaktionen des zweiten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung		K <sub>Korn</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>Korn</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Rohprotein- gehalt (% TM)
Kontrolle		4.44 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>	1.50 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>	10.78 $\pm$ 0.51 <sup>b</sup>
Pyreg		4.51 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	1.50 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	11.24 $\pm$ 0.73 <sup>b</sup>
K_50%N		4.31 $\pm$ 0.23 <sup>a</sup>	1.35 $\pm$ 0.10 <sup>ab</sup>	10.81 $\pm$ 0.51 <sup>b</sup>
Pyreg_50%N		4.72 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	1.51 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	11.01 $\pm$ 0.93 <sup>b</sup>
K_100%N		4.28 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	1.32 $\pm$ 0.06 <sup>ab</sup>	12.59 $\pm$ 0.53 <sup>ab</sup>
Pyreg_100%N		4.20 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	1.27 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	11.02 $\pm$ 0.47 <sup>ab</sup>
K_130%N		4.11 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	1.26 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	13.22 $\pm$ 0.96 <sup>a</sup>
Pyreg_130%N		4.20 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	1.29 $\pm$ 0.07 <sup>ab</sup>	13.34 $\pm$ 0.65 <sup>a</sup>
	df		P-Werte	
Biokohle	1	0.177	0.321	0.675
Stickstoff	3	<b>0.025</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
Biokohle* Stickstoff	3	0.304	0.218	0.703



**Tabelle A5:** Ertragsstruktur, Nährstoffgehalte Weizenstroh und die P-Werte für die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff und Interaktionen des dritten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; BC = Biokohle; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung		Ähren m <sup>-2</sup>	Körner Ähre <sup>-1</sup>	Tausendkorn- gewicht (g)	N <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	K <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	Mg <sub>Stroh</sub> (g kg <sup>-1</sup> )
Kontrolle		391.20±20.99 <sup>a</sup>	18.66±7.37 <sup>b</sup>	45.34±0.53 <sup>a</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>	0.95±0.08 <sup>a</sup>	6.84±0.18 <sup>b</sup>	0.81±0.08 <sup>a</sup>
Pyreg		386.57±49.60 <sup>a</sup>	18.55±7.76 <sup>b</sup>	45.12±0.87 <sup>a</sup>	0.28±0.04 <sup>b</sup>	0.96±0.04 <sup>a</sup>	7.58±0.61 <sup>ab</sup>	0.73±0.08 <sup>ab</sup>
K_GR		426.70±30.59 <sup>a</sup>	19.52±5.42 <sup>b</sup>	45.51±0.82 <sup>a</sup>	0.28±0.03 <sup>b</sup>	0.96±0.05 <sup>a</sup>	7.29±0.71 <sup>ab</sup>	0.73±0.06 <sup>ab</sup>
Pyreg_GR		389.66±24.48 <sup>a</sup>	20.66±4.20 <sup>b</sup>	45.88±1.42 <sup>a</sup>	0.28±0.04 <sup>b</sup>	1.06±0.17 <sup>a</sup>	7.60±0.19 <sup>ab</sup>	0.76±0.06 <sup>ab</sup>
K_100%N		481.48±69.11 <sup>a</sup>	35.12±3.11 <sup>a</sup>	46.23±1.64 <sup>a</sup>	0.40±0.11 <sup>a</sup>	0.66±0.16 <sup>b</sup>	7.75±0.37 <sup>ab</sup>	0.64±0.08 <sup>b</sup>
Pyreg_ 100%N		472.99±110.03 <sup>a</sup>	36.78±7.87 <sup>a</sup>	46.10±0.78 <sup>a</sup>	0.37±0.03 <sup>a</sup>	0.61±0.16 <sup>b</sup>	7.86±0.77 <sup>ab</sup>	0.66±0.11 <sup>ab</sup>
K_GR_ 100%N		425.15±41.13 <sup>a</sup>	40.65±3.57 <sup>a</sup>	46.99±1.43 <sup>a</sup>	0.43±0.08 <sup>a</sup>	0.72±0.17 <sup>b</sup>	8.37±1.24 <sup>a</sup>	0.64±0.06 <sup>b</sup>
Pyreg_GR_ 100%N		481.48±44.37 <sup>a</sup>	34.79±5.02 <sup>a</sup>	46.64±1.29 <sup>a</sup>	0.41±0.06 <sup>a</sup>	0.78±0.25 <sup>b</sup>	8.24±0.29 <sup>a</sup>	0.64±0.09 <sup>b</sup>
	df	P-Werte						
Biokohle	1	0.934	0.695	0.793	0.717	0.553	0.276	0.849
Gärrest	1	0.902	0.425	0.087	0.349	0.117	0.128	0.468
Biokohle* Gärrest	1	0.668	0.443	0.766	0.978	0.299	0.482	0.333
Stickstoff	1	<b>0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.003</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.005</b>	<b>&lt;0.001</b>
Biokohle* Stickstoff	1	0.243	0.519	0.613	0.404	0.668	0.264	0.442
Gärrest* Stickstoff	1	0.259	0.944	0.775	0.524	0.544	0.568	0.842
BC*GR*N	1	0.206	0.286	0.514	0.684	0.953	0.834	0.188

**Tabelle A6:** Nährstoffgehalte Weizenkorn, Rohproteingehalte und die P-Werte für die Faktoren Biokohle, Gärrest und Stickstoff und Interaktionen des dritten orthogonalen Kerns. Mittelwerte  $\pm$  SD; BC = Biokohle; Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ) zwischen den Behandlungen. Die signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen ( $P \leq 0.05$ ) sind fett dargestellt.

Behandlung		$P_{\text{Korn}}$ (g kg <sup>-1</sup> )	$K_{\text{Korn}}$ (g kg <sup>-1</sup> )	$Mg_{\text{Korn}}$ (g kg <sup>-1</sup> )	Rohprotein- gehalt (% TM)
Kontrolle		4.39 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>	4.44 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>	1.50 $\pm$ 0.16 <sup>ab</sup>	10.78 $\pm$ 0.51 <sup>b</sup>
Pyreg		4.51 $\pm$ 0.24 <sup>a</sup>	4.51 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	1.50 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	11.24 $\pm$ 0.73 <sup>b</sup>
K_GR		4.67 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	4.63 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	1.56 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	11.44 $\pm$ 0.60 <sup>b</sup>
Pyreg_GR		4.49 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	4.42 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>	1.49 $\pm$ 0.10 <sup>ab</sup>	10.77 $\pm$ 0.55 <sup>b</sup>
K_100%N		4.17 $\pm$ 0.19 <sup>a</sup>	4.28 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	1.32 $\pm$ 0.06 <sup>ab</sup>	12.59 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>
Pyreg_100% N		4.07 $\pm$ 0.19 <sup>a</sup>	4.20 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	1.27 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	11.02 $\pm$ 0.47 <sup>b</sup>
K_GR_100% N		4.09 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	4.10 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	1.28 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	13.04 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>
Pyreg_GR_1 00%N		4.24 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	4.19 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	1.31 $\pm$ 0.09 <sup>ab</sup>	13.08 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>
	df	P-Werte			
Biokohle	1	0.975	0.745	0.532	0.536
Gärrest	1	0.366	0.813	0.753	0.094
Biokohle* Gärrest	1	0.863	0.745	0.979	0.395
Stickstoff	1	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.002</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>
Biokohle* Stickstoff	1	0.773	0.686	0.663	0.888
Gärrest* Stickstoff	1	0.629	0.456	0.731	0.205
BC*GR*N	1	0.151	0.231	0.326	0.085

**Tabelle A7:** Artenstruktur bzw. Gattungen der gefundenen Bodentiere der ersten Probenahme (6. März 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben ist die Abundanz der Arten (Individuen m<sup>-2</sup>) (O.- Ordnung; U.O.- Unterordnung; K.- Klasse; F.- Familie).

	K_ 100 % N	Pyro_ 100 % N	HTC_ 100 % N	HTCferm_ 100 % N	Pyreg_ 100 % N
<b><u>Arachnida</u></b>					
O. Milben (Acari)	2505	2176	2863	3917	1146
Fam. Webspinnen (Araneae)	0	32	0	32	0
<b><u>Crustacea</u></b>					
U.O. Landasseln (Isopoda)	64	0	0	32	0
<b><u>Insecta</u></b>					
O. Eintagsfliegen (Ephemeroptera)	64	0	32	0	32
U.O. Mücken (Nematocera)	80	48	64	32	64
O. Schnabelfliegen (Mecoptera)	32	0	0	0	32
<b><u>Insektenlarven</u></b>					
F. Blattlauslöwen (Hemerobiidae)	0	0	32	0	0
F. Bienen- und Hummellarve (Apidae)	74	96	106	96	53
<b><u>Coleoptera</u></b>					
F. Kurzflügler (Staphylinidae)	64	32	223	175	191
F. Laufkäfer (Carabidae)	32	0	0	42	32
<b><u>Käferlarven</u></b>	431	96	64	160	160
<b><u>Lepidoptera</u></b>					
F. Holzbohrerlarve (Cossidae)	96	127	127	117	191
<b><u>Myriapoda</u></b>					
K. Wenigfüßer (Pauropoda)	308	32	287	430	159
K. Hundertfüßer (Chilopoda)	32	64	0	0	0
<b><u>Annelida</u></b>					
F. Regenwürmer (Lumbricida)	32	0	0	0	0
F. Borstenwürmer (Enchytraeida)	525	159	159	53	159
<b>K. Springschwänze (Collembola)</b>	939	1040	1489	844	549

**Tabelle A8:** Artenstruktur bzw. Gattungen der gefundenen Bodentiere der zweiten Probenahme (28. April 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben ist die Abundanz der Arten (Individuen m<sup>-2</sup>) (O.- Ordnung; U.O.- Unterordnung; K.- Klasse; F.- Familie).

	K_ 100 % N	Pyro_ 100 % N	HTC_ 100 % N	HTCferm_ 100 % N	Pyreg_ 100 % N
<b><u>Arachnida</u></b>					
O. Milben (Acari)	1602	939	1409	1807	1210
<b><u>Crustacea</u></b>					
U.O. Landasseln (Isopoda)	0	0	0	8	0
<b><u>Insecta</u></b>					
O. Eintagsfliege (Ephemeroptera)	0	64	16	0	8
U.O. Mücken (Nematocera)	0	48	32	48	8
O. Fransenflügler (Thysanoptera)	21	0	8	24	0
<b><u>Insektenlarven</u></b>					
F. Blattlauslöwen (Hemerobiidae)	0	0	96	64	16
F. Bienen- und Hummellarve (Apidae)	0	8	32	8	32
F. Schnakenlarve (Tipulidae)	0	0	16	24	0
<b><u>Coleoptera</u></b>					
F. Kurzflügler (Staphylinidae)	223	56	80	159	127
F. Laufkäfer (Carabidae)	0	8	8	8	8
<b><u>Käferlarven</u></b>	0	0	0	159	0
<b><u>Lepidoptera</u></b>					
F. Holzbohrerlarve (Cossidae)	21	16	16	32	0
<b><u>Myriapoda</u></b>					
K. Wenigfüßer (Pauropoda)	180	223	478	581	175
K. Hundertfüßer (Chilopoda)	0	0	8	0	16
<b><u>Annelida</u></b>					
F. Regenwürmer (Lumbricida)	11	8	0	0	0
F. Borstenwürmer (Enchytraeida)	32	24	64	64	56
<b>K. Springschwänze (Collembola)</b>	1412	1226	844	1616	669

**Tabelle A9:** Artenstruktur bzw. Gattungen der gefundenen Bodentiere der dritten Probenahme (23. Oktober 2013) in den unterschiedlichen Behandlungen (n=4). Gegeben ist die Abundanz der Arten (Individuen m<sup>-2</sup>) (O.- Ordnung; U.O.- Unterordnung; K.- Klasse; F.- Familie).

	K_ 100 % N	Pyro_ 100 % N	HTC_ 100 % N	HTCferm_ 100 % N	Pyreg_ 100 % N
<b><u>Arachnida</u></b>					
O. Milben (Acari)	398	1346	844	740	804
Fam. Webspinnen (Araneae)	0	0	24	16	0
<b><u>Insecta</u></b>					
O. Eintagsfliege (Ephemeroptera)	8	0	0	0	0
U.O. Mücken (Nematocera)	8	16	0	16	8
O. Schnabelfliegen (Mecoptera)	0	0	8	0	0
U.O. Wanzen (Heteroptera)	8	24	0	0	0
<b><u>Insektenlarven</u></b>					
F. Blattlauslöwen (Hemerobiidae)	0	0	0	0	8
F. Bienen- und Hummellarve (Apidae)	0	16	24	32	32
F. Schnakenlarve (Tipulidae)	0	103	24	8	24
<b><u>Coleoptera</u></b>					
F. Kurzflügler (Staphylinidae)	16	64	24	48	48
<b><u>Käferlarven</u></b>	0	16	0	16	64
<b><u>Lepidoptera</u></b>					
F. Holzbohrerlarve (Cossidae)	8	0	0	0	16
F. Jungfernkinderlarve (Archiearinae)	8	0	8	0	0
<b><u>Myriapoda</u></b>					
K. Wenigfüßer (Pauropoda)	56	127	8	24	64
K. Hundertfüßer (Chilopoda)	32	0	0	0	0
<b><u>Annelida</u></b>					
F. Regenwürmer (Lumbricida)	0	8	8	0	16
F. Borstenwürmer (Enchytraeida)	0	40	0	32	8
<b>K. Springschwänze (Collembola)</b>	637	804	1098	366	1130

## Danksagungen

Ich möchte Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer für die sehr gute Betreuung sowie die ausführlichen, zielgerichteten Ratschläge und Diskussionen danken. Christina-Luise Roß danke ich für die tolle Unterstützung und die wertvollen Ratschläge. Ebenfalls geht ein besonderer Dank an Dr. Klaus-Peter Götz für die Unterstützung, großartige Kooperationen und Ideen vom Beginn bis zum Ende der Versuche sowie ein jederzeit offenes Ohr. Dr. Thomas F. Döring danke ich für die statistische und wissenschaftliche Unterstützung sowie ein ebenfalls jederzeit offenes Ohr.

Prof. Dr. Liliane Ruess und Dr. René Seiml-Buchinger danke ich für jegliche Unterstützung und anregende Diskussionen im Bereich der Bodenbiologie. Prof. Dr. Zeitz und Prof. Dr. Kühne danke ich für die Bereitschaft der Erstellung der Gutachten. Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die zum Gelingen der Versuche beigetragen haben, möchte ich mich für die Unterstützung bedanken. Ein besonderer Dank geht dabei an Heiko Vogel, Andreas Muskolus und seinem Team sowie dem Team der Lehr- und Forschungsstation in Berlin-Dahlem. Besonders bedanken möchte ich mich ebenfalls bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Gemeinschaftslabors Analytik des Albrecht Daniel Thaer-Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften für die Durchführung der chemischen Analysen. Frau Dr. Kroschewski gilt mein Dank für die statistische Beratung bei der Versuchsauswertung. Dem ATB danke ich für die Koordination des Projektes und die Organisation von Veranstaltungen. Auf diesen Projekttreffen sind wichtige Kooperationen entstanden. Dabei geht ein besonderer Dank an Dr. Peter Lentzsch vom ZALF Müncheberg für die Idee und Leihgabe der Rhizoboxen. Herrn Prof. Dr. K.D. Wutzke, Leiter des Forschungslabors der Universität Rostock, und seinen Mitarbeiterinnen Frau Salewski und Frau Schläfke, bin ich für die Isotopenmessungen zu großem Dank verpflichtet.

Ganz herzlich möchte ich auch meiner Familie danken, die mich immer unterstützt und motiviert hat.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Biokohlen in der Landwirtschaft – Perspektiven für Deutschland und Malaysia“ von der Leibniz-Gemeinschaft im Rahmen des Paktes für Forschung und Innovation (SAW) gefördert.

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich und inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere außerdem, dass ich die vorliegende Dissertation nur in diesem und in keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht habe und dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.